量子力学史

天野 清

1973刊

量子力学史

天野　清

自然選書

中央公論社

装幀　白井晟一

目次

量子力学史

凡例

本書は日本科学社版『天野清選集』第一巻「量子力学史」(昭和二十三年三月刊)の改訂増補版である。すなわち、「付録§4」として「他の学問領域との交渉」を新たに収めたうえ、本書「解題」で述べた校訂方針(三三八—三四〇ページ)によって日本科学社版を全面的に校訂したものであるが、以下にその主な改訂点を略記しておく。

一、全体を縦組にし、数量・数式の表記なども可能なかぎり縦組とする。

二、新字使用、新かなづかいとし、漢字は読みやすさのための配慮からなるべく平がな表記に改め、特殊な用字には見開きページのその初出箇所にルビを付す。

三、固有名詞の原語表記は、(a) 地名についてはすべてカタカナに改め、最近の慣行表記法にならい、(b) 人名についても (a) と同様に扱うが、生歿年などが付されて特記されている人名については、そのカタカナ表記につづけて原語綴をのこす。

術語ないし特殊語が原語で表記されている場合については、原則として、それぞれの初出箇所で原語綴につづけて〔 〕内に注釈を付し、また原文ですでに術語ないし特殊語につづけて( )内に付記されている原語については、( )を省き、ポイントを下げてのこす。ただし原注においては、このかぎりでない。

なお、書誌名はイタリックとする。

四、〔 〕はいずれも校注の表示であり、その内容は、原文の補足注、訳注などであり、文章の修正についてはここルビを付して各章末に原文を注記する。なお、「解題」6、とくにその(5)、(8)を参照されたい。

§1　十九世紀末におけるドイツ工業の発展と研究機関の増設

欧米の産業は産業革命以来、十九世紀末にかけて加速度的に発展の一路をたどった。周期的に襲ってきた一時的停頓、数次の恐慌も、結局は産業の技術的装備の改革と、旧式な技術にたよっていた小企業を整理することに終わり、全体としての膨張は抑止されなかった。

なかにも、他のあらゆるヨーロッパ諸国に先んじたイギリスの工業は、機械的生産の終局的な勝利、通信・交通ことに鉄道の急速な発達、尨大な規模に及んだ植民地その他との海上貿易等に助長されて、五、六〇年代には独占的な繁栄をきたし、数十年にわたりイギリスをして「世界の工場」たる地位を保たせたのである。そしてこの状勢は、当然のこととして、この国の工学および自然科学にもきわめて活発な刺戟と活力を供給して、幾多の目覚ましい業績を生ませることとなった。物理学の領域でも、たとえばケルヴィンのごとく、一流の理論家が応用、技術へ著しい関心を示したのは注目すべきことである。

しかし、すでに七〇年代の末期には、この産業界における独占的地位も、背後に追い迫るドイツ、フランス、北米合衆国等の産業の抬頭に脅威を感じるに至った。もちろんイギリスにおいてもその

後も多数の工業部門が向上[1]をつづけたのは事実であるが、後進国の発展のテンポはきわめて急調であって、世紀の末に近づくにしたがい、イギリスの王座はついに動揺をきたしたのである。

いま、当時基礎的な科学の伝統に若く、したがって熱輻射論から量子論への発展をたどろうとするわれわれの課題にさしあたってやや傍系的な北米合衆国を度外視するならば、最も暴風的に躍進してきたのはドイツであった。一八七〇―七一年の普仏戦争は、五〇億フランの償金とアルサス、ローレンの豊富な産鉄地方をプロシャにもたらしたが、これはドイツ帝国の結成を助成し、その結果、商工業発達の障害であった封建的遺制は撤廃され、「鉄と血」の宰相ビスマルク（一八一五―九八）の改革以来、嵐のような企業熱の昂進を喚起し、ドイツの生産力は驚異的な躍進をつづけることとなった。

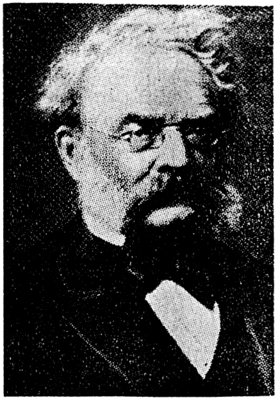
その時代のドイツが、国内の経済的発展の水準においても、植民地政策においても、英仏に比して立ち遅れていた事情は、保護政策の強力的遂行を必要とする一面、最新の技術をただちに工業化するには――すでに英国が悩みを感じていたような――従来の旧式な技術に基づく生産設備との摩擦相剋が少なかったために、技術改良、したがってまた工業教育の活発な要求と奨励が見られた。これはまたも一部の保守的勢力を抑え、物理学、化学の研究を鼓舞して、この方面においても先進国イギリスと覇を競うに至った。

近代工業の槓杆（てこ）は冶金工業であるといわれるが、世紀末近くドイツにおいてその発展のテンポが最も急激で世界の驚異となったのは、製鉄、製鋼の冶金工業[1]、ならびにそれにともなう金属工業、電気工業であり、化学工業はその以前からすでに世界に冠たるものがあった。生産力の急激な発展

に応じて、原料資源を獲得し、商品市場を開拓するためには、上述の強力政策の背景として、機械の生産、鉄道の大拡張に並んで、巨大な軍需工業の発展を実現させ、ドイツの「鉄鋼時代」を到来せしめた。かくしてビスマルクからヴィルヘルム二世の独裁にかわった九〇年代の半ばにおいて、冶金工業が最も典型的な形態でいわゆるドイツの帝国主義、独占の段階への大旋回を敢行せしめる基軸となったのは、経済史上周知のところである。

これらの工業がわれわれの課題とする物理学の領域に及ぼした影響は、のちにも詳述するとおり、きわめて直接顕著なものがあった。まず冶金工業の重要な工程たる熔解、鍛錬、焼入の高温作業、加熱技術は、高温度測定ないし熱輻射研究の最も実際的な一つの動機であった。また電気工業が動力および照明の要求に応じて技術的研究を開拓し、とくに後者の灼熱電燈の場合にはわれわれの問題と深い関連がある。前世紀末には瓦斯(ガス)燈もまだ旧(ふる)くはなかったが、都市照明の急速な発展とともに、ドイツではいちはやく電燈がこれにかわろうとして、その結果、電球製造工程に欠くことのできぬ真空技術を進歩させ、X線を含む原子物理学の実験に重要な補助手段を提供したのであるが、これについてはのちに述べるところがあろう。他方、照明のエネルギー経済の見地から、瓦斯マントルや電燈の灼熱繊条(当時は主として炭素線)の輻射エネルギーの分光的な分布が、いわゆる光経済 Lichtökonomie の基礎的な問題として重要な研究対象となってきた(2)。

こうして九〇年代の初め以来、無線電信、電燈照明、高度真空装置への応用のごとき物理学と直接な共同研究を要する工学部門の誕生にともない、「研究室の竈(かま)を出てまだ冷めやらぬ物理学のパンが頻繁に食卓にのぼせられるようになった(3)」。



Wer. v. ジーメンス

以上述べたような技術改良の切実な要求に応じ、十九世紀の後半から今世紀の初頭にかけて欧米各国における物理学および化学方面の研究機関（Institute および Laboratory）の創設ないし拡張にはすこぶる目覚ましいものがあった。この点においても英国ははるかに他に先んじ、原子物理学への寄与によってわれわれの課題に最も緊密な関係を有するケンブリッジの Cavendish Laboratory〔キャヴェンディシュ研究所〕は一八七四年に設立されたのであるが、この研究所に関してはのちにふたたび述べることにする。ドイツでは一八八四年[4]〔の〕ヴェルナー・ジーメンスの寄付を基金としてベルリンに Physikalisch-Technische Reichsanstalt（国立物理工学研究所、略してP・T・Rともいうが、われわれは国立研究所と呼んでおく〔のちの Physikalisch-Technische Bundesanstalt、P・T・B〕）が創立され、ヘルムホルツが一八八八年初代の総長 Präsident となったのであるが、一八九七年にはその建物は一躍三倍に拡張されている。

われわれの課題たる量子論の起源と密接な関係のあるこの国立研究所の創立の歴史にはきわめて教訓的な挿話が少なくない。プロシャでは物理学および工学に関する国立研究所設立の計画はすでに一八七〇年代の初め、皇太子フリードリヒ・ヴィルヘルムの師ハインリヒ・シェルバッハ、ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ、E・デュ・ボア＝レイモンらによって企てられたが、ベルリンの王立プロシャ科学学士院の著名な学者たちの反対などもあり（一八七三）、皇太子の支持と、当時プロ

シャの測量中央委員長をしていたかの名将モルトケ伯の熱心な援助とをもってしても容易に実現できなかった。この計画に賛同したドイツ電気工学の父ヴェルナー・フォン・ジーメンスはついに政府に対して、研究所の土地および建物の寄付を申し出たが、そのとき政府に宛てた彼の書簡は当時の「進歩的」工業家の典型的な見解を表明している。そのなかで彼はまず、大学のごとく教育を主とする機関とは別に、学者が研究に専心しうる組織の必要を強調し、他方、工場〔で〕はまた一般には精確な研究が困難であることを説明したのち曰く

「現在激しくおこなわれている諸民族の角逐闘争においては、新たな軌道を最初にとらえ、それに基づく工業部門を最初に発展させた国が決定的優勢を占めることになる。こうした新軌道を新たに創り、もしくは新たに生命を与えるものはほとんど例外なく新たな自然科学的発見であり、ときにはそれもきわめて目立たぬものであることも稀ではない。新しい自然科学的事実が技術的に利用しうるかどうかは通例それを完全に組織的に仕上げてから、すなわち、長い年月を経てから初めて判明することが多い。ゆえに科学的進歩を物質的効用によって左右せしむべきでない。」

しかも

「自然科学的研究の奨励は一国の物質的利益の促進にきわめて有効である。……科学的教養 Bildung ではなくして科学的業績 Leistung が一国民に文明民族中での名誉ある地位を与える。」

「よってこの業績の国民の平均的教養の高さに相応させるのに必要な研究機関を設置することは国民〔家?〕的課題である」と論じた（一八八四年三月二十日）。この有名な提案が議会の予算委員会の反対を抑え、ベルリンのシャルロッテンブルクに建物ができたのは一八八七年であり、開設後まも



H. v. ヘルムホルツ

なく業績とみに上がり、初代の総長 Präsident ヘルムホルツと次のF・コールラウシュの時代を人は国立研究所 Reichsanstalt の古典時代 Klassische Periode と呼んでいる。

量子論の起源とは直接の関係はないが、このドイツにおける国立研究所の成功に刺戟されてこれとほとんど目的を同じゅうする国立研究所が英国では National Physical Laboratory〔国立物理研究所 N・P・L〕がロンドン郊外のテディントンに一八九九年から開かれた（Cavendich Laboratory の Standard Committee〔標準委員会〕も翌年ここへ移された）が、これもまた最初の Director〔所長〕のR・T・グレイズブルックが言ったように "to make the force of science availabe to the nation〔自然科学の力を国家の用に供することができるようにする〕" を目的とするものであり、科学を工業への応用のために研究せんとするこの方針は、さらに一九〇一年に開設された米国の National Bureau of Standards〔国立標準局、N・B・S〕においてはいっそう著しいものがある。

国立研究所以外でも、あるいは独立に、あるいは大学に付属する教室としてこの時代に創設または拡張されたものは枚挙に遑（いとま）もない。そしてこのころから以後、実験物理学の著名な研究の大半はこれらの政府や大財団の支持による Laboratory や Institute において遂行されるようになった。

しかしながら、これらの強く時代的な国家的制約を受けた研究所の業績が、科学の独自な客観的

理論によって、緊迫した差当りの必要と狭い国境をはるかに越えた幾多の発見を導〔2〕いたこと、導かざるをえなかったことは、われわれに示唆するところ少なくない。

かくのごときが世紀の転回期における欧米の状勢であり、量子論誕生の社会的背景であった。

(1) 統計の示すところによれば、一八九〇年イギリスの半ばに足らなかった鉄鋼〔3〕の生産額は、九四年にはまず鋼鉄が、一九〇一年には銑鉄がこれに追いついている。一九〇一年にはイギリスをついに凌駕し、十年前の四倍となっている（ドイツ鉄鋼協会、V・D・Eの統計。ゾムバルト、クノーがその経済史に掲げるところも大同小異である）。この期間はのちに述べる国立研究所の熱輻射研究の時期と一致する。

(2) O. Lummer, *Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik* (1918)

(3) W. Wien, *Neuere Entwicklung der Physik*, Leipzig (1919) 中の Physik und Technik, S. 86。

(4) この年ヘルムホルツの娘エレンはジーメンスの長男アルノルト・ヴィルヘルム・フォン・ジーメンスに嫁した。

〔1〕 選集版では「上向」。

〔2〕 選集版では「に」。

〔3〕 選集版では「鋼鐵」。

§2 十九世紀後半における理論物理学の展望[1]

ニュートン力学の体系は、十八世紀の末葉大哲カントによってその基礎概念に哲学的根拠を与えられ[2]、あらゆる精密科学の理想として永久化された。ラグランジュ[3]やラプラス[4]らの解析的研究にはもはや古典力学の物理的基礎に対する一片の不安のかげもなく、数学的形式的な完成とともに特殊問題への広汎な展開のみがあった。すなわち、力学の対象が天体の運動と機械的な過程、もしくはたかだか簡単な流体の問題に局限せられ、他の現象に関しては研究がまだその初歩的段階を脱しなかった当時にあっては、実質上数学の一分科と化した力学の基礎に疑念をはさみ、物理学固有の領域で批判を企てる機縁はまったく見当たらなかった。したがってここにも方法上、十八世紀以来の経済界の主潮たるレッセ・フェール laissez-faire（一七七六―一八五〇）の時代がなお学界の主流であったのは怪しむに足りない。

宇宙の体系に神の仮説は不必要であり、世界の全未来は一大連立方程式の解として決定されるという力学的自然観の誇らしい宣言も当時としてはむしろ当然であった。

後年深い意義を見出されたW・R・ハミルトンの諸研究[5]もなんら基礎的な革新を意図するもので

はなかった。

七〇年代に入り、一面においては空しく壊滅し去ったヘーゲル、シェリングの思弁的形而上学の反動として、他方においては進化論を機縁として流行したったビュヒナー、ヘッケルらの俗流唯物論への批判として、認識論的傾向をもつ科学論が勃興したが、「カントに還れ」を標榜する新カント派も、遠くヒュームに流れを汲む経験的・実証的・現象論的立場に立って機械的自然観の神話性を批判する **Energetik**〔エネルギー一元論〕も、実質的には力学の法則に変革をもたらすようなものではなかった。力学の課題を運動の「記述 **Beschreibung**」に限定したキルヒホフの力学講義[6]（一八七六）も、一歩を進めてニュートン力学の基礎概念を批判し、就中(なかんずく)、回転運動の絶対性を取り除こうとしたマッハの「歴史的・批判的」研究[7]（一八八三）もなんらの数理的定式化にはすまず、カント主義に影響されること深く、力の概念を素朴なものとして拒(しりぞ)けたヘルツの力学（一八九四）も、いずれも遠隔作用の観念に基づいていて、のちの一般相対性理論に見られるごとき力の場の理論を展開[1]するに至らず、ニュートン力学を覆えそうとはしなかった。

これを要するに、十九世紀前半には力学に変革を及ぼすような現象は見出されなかったし、後半には、幾多の新事実の発見も、力学の基礎を揺るがすには研究があまりにも萌芽状態を脱していなかったといえるのである。

しからば、前世紀の後半に完成された**理論**物理学の新たな領域は何であったか、**熱力学**とこれに関連した**気体の運動学的理論**、および電磁力学とくに**光の電磁論**を挙げることに大きな異論はあるまいと信じる。そしてこの三つの理論のいずれもが、量子論を胚胎した熱輻射の理論的探究に均(ひと)し

く大きな役割を演じたのである。H・A・ローレンツの電子論のごときはむしろ試験的・過渡的理論と見るべきであろう。

すでに産業革命は、その原動力の一つとなった蒸気機関の研究からカルノーその他の物理学的業績に機縁を与えたが、J・R・マイヤー（一八四二）、ジュール（一八四一―五〇）、ヘルムホルツ[8]（一八四七）の努力によってエネルギーの恒存則が確立せられ、ここに熱力学は第一歩を踏み出したのであった。恒存則の偉大なる意義は、それが同種の現象間におけるいわゆる力の保存を主張するにとどまらず、異種の現象形態がいずれも相互に転化しあい、その転化が一定の量的比率をもっておこなわれるという点にある。これによって、全自然現象の基礎に存する深刻な統一が、実証的科学的に確立されるのである。

これに対しクラウジウス[9]（一八五〇）およびW・トムソン（のちのケルヴィン卿）（一八五二）によって確立された熱力学の第二主則は、現象変化に初めて時間の向きを導入し、エントロピーの概念によって不可逆的現象の量的取扱いを可能にした。熱力学は物理学と化学との限界領域の探究を著しく促進するとともに、工業的応用には効率の概念、理論物理学には絶対温度の概念のごとき重要なる礎石を置いた。この現象論的性格をもつ熱力学の大きな成功が、のちにマッハやオストワルトのごとき学者が Energetik〔エネルギー一元論。原子論に対するものとしての〕を主張する根拠となったのである。

一方、エネルギー恒存則に観取される現象の統一は、背後に存する要素的過程を示唆し、世紀の前半すでにドールトンらの研究により科学的に仮説となっていた原子論にその解決を求めるに及ん

で、いわゆる気体の運動学的理論 kinetic theory of gas が生まれるに至った。このイデーはすでに古くD・ベルヌイら[10]にも見られるが、ここでまずクレーニヒ、[11]ついでクラウジウス[12]（一八五七）がこの立場から気体の法則を解明し、さらにマクスウェル（一八六〇）がはじめて[2]有効に確率の理論を適用して気体分子の速度分布則を得るに及び、ようやくこの学問も軌道に乗ってきた。しかし当時にあっては、原子・分子の仮説に懐疑的態度をとる学者が大多数であって、のちの Energetik にも見るごとく、原子論を形而上学的ドグマと見なし、その物理的に不生産的なことにも攻撃が絶えなかったのであるから、一生を原子論の闘士として闘い抜いたボルツマンが大胆にも気体運動論の見地から確率論的に第二主則を根拠づけ、有名なH定理を導いた業績はますます輝きを加えるのである。

気体の運動学的理論はのちにボルツマンやギブズらの努力によって一般化され、統計力学を生んだ。そしてこの統計力学の重要な定理の一つであるエネルギー等配分律 law of equipartition of energy が、たとえば二原子分子の比熱に適用すると経験と矛盾することは、ボルツマンやギブズにももっと早くからよく自覚されていた。ただこの不一致は主として分子の構造に対する知識が不十分なことに起因すると考えられていたが、じつはこれがはるかに深刻な意義を潜めていることはのちに明らかとなるのである。

電磁気学の領域では、世紀の前半におけるファラデイの研究、彼の力線の着想がマクスウェルの電磁場論の機縁となり、その完成によって、ニュートン以来の遠隔作用に近接的・連続的な場の理論が対置されることになった。しかしマクスウェルが理論を建設するにあたって、最初、電磁場を

エーテルの歪みに帰せしめようとしたが、その不可能を悟ってモデルの構成を断念したことは、方法論的に注目すべき事実である。この抽象性は光の電磁論においてとくに著しい。古典物理学最後の大立物の一人たるケルヴィン卿が光を力学的モデルで説明しようと努力し、

"I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. If I can make a mechanical model, I can understand it. As long as I cannot make a mechanical model all the way through, I cannot understand it. 〔事物の力学的モデルを作ることができるまでわたしは満足しない。力学的モデルを作ることができれば、わたしは事物を理解できるが、力学的モデルをどのようにしても作ることができないかぎり、わたしは事物を理解できない〕"

と告白し、空しく模索したことは人も知るところであるが、[13] かような悩みをいだいたのはケルヴィン一人ではなかったのである。当時新進気鋭のH・A・ローレンツすらがマクスウェルの理論の抽象性に困惑し、パリに赴いてこの理論の解説書の著者を訪れたところ、そこで彼が得た返答は、マクスウェルの理論は総じて理解できないこと、そこには純数学的な、まったく抽象的な形式のみがあるということであった(ヨッフェの回想による)。

しかしヘルツの電磁波伝播に関する実験的証明は、モデル構成の問題をそのままに措いて、電磁論を一般に信頼せしめ、広汎な応用への道を拓くことになったが、他方では電磁波、熱波、光波は単なる量的差違に還元されて理論的に統一され、のちにプランクが説いた「物理学の人間的感覚性からの離脱」の主張に有力な材料を準備した。

さて、以上のように十九世紀後半において新しく完成された熱力学、気体論、電磁力学はいずれ

も今日では「古典」物理学の名を冠せられ、世紀末の相次ぐ大発見から生まれてきた新物理学とは対照して考えられるものである。それにもかかわらずマックス・プランクが熱輻射の問題に関連して、当時としては新しかったこれらの学問の帰結を徹底的に追求し、綜合して、ついに量子論の創唱に導かれたことは歴史の法則の例外ではないであろう。

(1) 量子論は十九世紀にあってはまったく夢想もされず、その出現は革命的なものであったが、しかしやはり、前世紀の理論物理的研究のただ中から生まれたものである。

(2) I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft* (1781)

(3) J. L. Lagrange, *Mècanique analitique* (1788)

(4) Laplace, *Traité de mècanique céleste* (1799) 等。

(5) W. R. Hamilton, *Phil. Trans.* (1834) p. 307 および (1835) p. 95。光学的研究は *Trans. Irish. Acad.* vol. 15, p. 69, (1828); vol. 16, p. 93, (1830)。これらはすべて近年発行された彼の論文集に収められてある。主としてラグランジュによって発展せしめられた Differentialprinzipe の力学に対し、ハミルトンおよびヤコビの名に結びつくのは Integralprinzipe の力学であるといわれる。

(6) *Vorlesungen über mathematische Physik, I, Mechanik* (1878)

(7) *Die Mechanik, in ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt* (1883)

(8) *Über die Erhaltung der Kraft*, Berlin (1847) ヘルムホルツが Kraft という名で呼び、クラウジウスが Arbeit と呼んだものをTh・ヤングの先例によって Energie と名づけたのは Rankine (*Phil. Mag.* (4) vol. 4, 1852) である。これらについてはプランクの *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, 1887 邦訳大思想全集（春秋社）を参照。

(9) Über die bewegende Kraft der Wärme, *Pogg. Ann.* Bd. 79, S. 368, u. 500 (1850) Entropie の概念は *Pogg. Ann.* Bd. 93, S. 481 (1854)。

(10) *Hydrodynamik* (1738) Sec. 10

(11) *Pogg. Ann.* Bd. 99, S. 315 (1856)

(12) *Pogg. Ann.* Bd. 100, S. 355 (1857)

(13) しかし「公式 formulas で思惟せずに像 image で思惟する」というポアンカレの評はケルヴィン一人に当てはまるのではなく、われわれの熱輻射論においてもキルヒホフ、ボルツマン、ヴィーンらいずれもその証明に直観的な思考実験を用いている。

〔1〕選集版では「展闢」。

〔2〕選集版では「極めて」。

〔3〕選集版では「……全く夢想もされなかつたが、しかしその出現は革命的なものであつたが、やはり、」。

§3　熱輻射の理論的・実験的研究[1]

ニュートン[2]、プレヴォ[3]らの古い研究にまで溯(さかのぼ)ることなく、プランクの量子論創唱と多少とも直接な関係をもつ研究に限るならば、われわれは十九世紀後半に入って、キルヒホフの輻射法則の確立に注目すべきであろう。

その精厳な学風により理論・実験の両方面で令名を馳せたグスターフ・キルヒホフ[4] Gustav Kirchhoff（一八二四—八七）は、ヨリーがミュンヒェンへ去った後任としてブレスラウ大学以来の友人、化学者ロベルト・ヴィルヘルム・ブンゼン[5] Robert Wilhelm Bunsen（一八一一—九九）の推薦によって、一八五四年ハイデルベルク大学の物理学教授となり、ともに同僚となって親しく交っていたが、数年後にはヘルムホルツも生理学教授として来たから、たがいに励ましあって後年の偉大な研究の成果を胚胎したのは想像にかたくない。

一八五九年、キルヒホフとブンゼンは “Über die *Fraunhoferschen* Linien”（フラウンホーファー線について）と題する論文をベルリン学士院に発表し、これに機縁を得て有名な輻射法則の発見に達したが[6]、この研究の出発点は太陽スペクトルに関する両人の共同研究であった。太陽スペク

トルの線が食塩を含む焰のなかに認められる輝線と符号することは、すでにフラウンホーファーその人が、単なる偶然でないことを指摘したが[7]（一八一四）、のちフーコーは炭素弧光のスペクトラムを研究し、これに太陽光線を投射すると初めの輝線が暗線となることを発見した。[8] 彼にしても、この現象の一般的意義を把握したならばキルヒホフの名誉は彼に先んじられたであろうが、惜しむらくはフーコーは単にこれを弧光の特殊性としか思わなかった。また英国の学者からPriority〔優先権〕を帰せられるケンブリッジのウィリアム・ハロウズ・ミラーも一般性の明確な主張は〔し〕なかった。

キルヒホフは予(かね)て、種々の物質が発する輝線を精確に研究しようと欲していたが、よいプリズムを得なかったところ、一八五七年フラウンホーファーが研いたものを得、これによってブンゼンとともにまずドラモンドの石灰灯（一八二〇年ハールの発見になり、ドラモンドが灯台に利用したところの）がD線の輝線を発するのを見、これと分光器とのあいだに、それ自身としては同様にD線の輝線を発する食塩を浸したアルコール・ランプの焰を置いたところ、輝線が反転して暗線となることを発見し、石灰灯のかわりに日光を用うる場合にも同様の結果を得た。リチウム塩について見出した別の特有の線でもその現象が認められ、これからいわゆる分光学が誕生することになり、一方には天体を構成する元素の研究に、他方には化学分析における元素の検出にこれが応用されることが認められ、キルヒホフ、ブンゼンはただちに手に入るあらゆる物質についてスペクトラムの表を作成し、これを利用して間もなくブンゼンはデュルクハイムのミネラル・ウォーターから新原素(ママ)ルビジウム、セシウムを、一年後クルックスはタリウムを、さらに一年後にはライヒとリヒターが

インジウムを発見したが、かようにしてスペクトル分析は、あらゆる他の方法がおこなわれないほどのきわめて微量な元素の検出にも用いられるようになったし、天体研究やその他の広汎な応用は枚挙に遑(いとま)もない。当時の光学器械の分解能をもってしては十分精確でありえなかった波長の測定も、[9]その後、半世紀にわたる多数の学者の努力によって天文学的数字にも比すべき精密さを誇るまでに進歩したのであった。かように種々の元素が特有のスペクトラムを発散し吸収する特殊な機構に対する一応の解決〔に〕は、ボーアの原子論に至るまでの半世紀の歳月を要したのであるが、さらに前記フーコーおよびキルヒホフの報告の重要性を *Philosophical Magazine*〔に〕抄訳したジョージ・ガブリエル・ストークス George Gabriel Stokes（一八一九―一九〇三）がその後書き[10]でこれを音響学のアナロジーによって「ただちに力学的に説明できる」とし、たとえば一定の基音を発する弦が、遠方に発せられた同じ調子の音に共鳴し、それを吸収するごとく、「これの光学的応用も註釈も要しないほど明らかなことである」とした。このストークスの説明に一片の真理性が認められるにしても、事態は彼もキルヒホフその人も思いも及ばぬ古典物理の埒外にあったことをわれわれは知っている。[11]



R. W. ブンゼン

ストークスの大胆さに比して、キルヒホフ自身が試みた理論的研究の道はより謙虚な、しかし実り多いものであった。彼は上記の発散吸収に関する実験に機縁を得、数週間後同じくベルリン学士院に“Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von

Licht und Wärme: Berl. Ber. 1859. S, 783—787（光と熱の発散と吸収の間の連関について）”という短い論文の報告をしたが、このなかで彼は簡単な考察によって、熱力学から個々の波長の熱輻射に関する有名な法則「同一温度では同一波長の輻射線に対して、発散率の吸収率に対する比はすべての物体において同一である」ことを大体証明した。[1] かれはさらに翌年の論文で[12]証明を厳密にしたが、その一歩一歩に見事な思考実験を交えた推論はこの論文を古典に位せしめるほどである。この論文中で定義された完全な暗黒体（すなわちすべての投射光線を完全に吸収する理想的物体）、および、この黒体が、同一温度の物体に囲まれた閉じた空洞 Hohlraum と同等であることは、のちに理論的にも実験的にもきわめて重要な意義をもつこととなった。[13]

　これからのち、熱輻射の研究は前述の工業界の環境にも恵まれてどこの国にも優ってドイツに確固たる根を下ろした。[14] それらの研究のなかでもJ・シュテファンの、[2] 全輻射密度が絶対温度の四乗に比例するという関係はとくに有名となった。[15] ところが今日では忘れられてしまったが、当時シュテファンの関係を覆すような実験的結果がぞくぞく発表され、[16] それらのなかにはウェルナー・ジーメンスの弟で、かの冶金学上の偉大な発明や抵抗温度計で名高いヴィルヘルム・ジーメンス Wilhelm Siemens（一八二三—八三）の名も見出される。かような各研究者の結果が食い違ったのは、これらの実験はすべて黒体でない一般の固体について、その点の明瞭な自覚がなくおこなわれたためであって、ただ一人例外として広い範囲で四乗式を確認したシュネーベリはじつは意識せずに今日から見て黒体に近い条件で実験したからであった。のちにボルツマン、バルトリが証明したように四乗式は黒体に対してのみ理論的に導かれる式であるから、これがシュテファンのように白金や、

はなはだしきはガラスのような非黒体についてまで見出されたというのはまったく実験の不正確からきた偶然にほかならなかったわけであった。これは実験的研究においても理論的指導がいかに必要であるかを明らかにするとともに、実験の不正確さがかえって近似的な、簡単な法則を見出すのに僥倖するという、科学の歴史にときおり現われる事実の一つの例でもある。

若いころウィーン大学でシュテファンに学び、その助手をしていたこともあったボルツマンは、H・T・エディなる人の "Radiant heat as an exception of the second law of thermodynamics〔熱力学の第二主則の例外としての熱輻射〕" という論文を、彼が受け持っていた Beiblätter〔付録〕に抄録する際この著者の誤解を正そうとした。輻射と第二主則との外見上の矛盾は、輻射圧に注目すれば解消することは、すでにA・バルトリも詳細に論じていたが[17]、ボルツマンはさらにここで一歩を進め、その輻射圧が電磁気学の結果としてエネルギー密度の$1/3$であることを利用し、ついにシュテファンの四乗法則の式を黒体について証明することができた[18]（一八八四）。このバルトリ、ボルツマンの演繹中で注目すべきは、黒体輻射はその輻射圧を媒介として、あたかも**完全気体**のごとく取り扱われ、したがって、熱力学的系としてエネルギー、エントロピーの概念を適用できるものとされた点である。このアナロジーのなかには、のちのヴィーン、プランクの研究を通じ、はるかにボース－アインシュタインの Lichtquantengas〔光量子気体〕の思想を予感させるものが閃光のごとく隠見している。

以上は、あらゆる波長について積分された全輻射に関する研究であったが、輻射密度のスペクトラルな分布の最初の価値ある研究ともいうべきW・A・ミヒェルゾンの考察（一八八七）にもまた



L. ボルツマン

気体と輻射とのアナロジーは顕著である。このミヒェルゾンという人はのちにモスクワ大学の私講師になったが、この輻射式は彼のベルリン留学中に発表したものらしい。彼は空間中の輻射を考察しながら、固体のスペクトルの連続性は、固体を構成する「原子の振動の完全なる無規則性」に由来するから、これは確率計算の問題であるとし、この原子群がマクスウェルの速度分布則にしたがうと仮定している。これらの振動数はそれぞれ原子の瞬間の速度に比例するとし、この着想はのちにヴィーンが彼の分布式を導く際に「glückliche Gedanke〔幸運な着想〕」と称えて自らも採用しているが、もし当時として新しいこの原子論的考察をさらに一歩進めるなら、のちのアインシュタインの光量子的輻射論に近づくことになる。

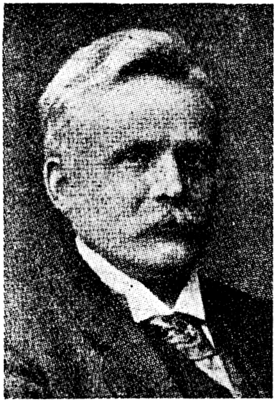
しかし、このW・A・ミヒェルゾンの式は実験とは食い違い、正しいものではなかった。

当時、エディソン（一八七九）、スワンらの電灯はようやく照明工学に刺戟を与え、熱輻射のスペクトラルな分布の実験的研究は欧米各国に勃興してきた。ティンダルはすでに一八六六年、電弧光の可視強度と全強度との比を測定しているが、天体物理学の大家であり、のちに最初の動力による飛行機（一八九六）に成功した有名なS・P・ラングレイ S. P. Langley（一八三四―一九〇六）は、ボロメーターの考案者[3]として長波長赤外線の測定を開拓し、太陽や炭素線の輻射研究をおこなった。そのほかシュライエルマッヒャー、ボトムレイ、ニコルズらは900℃から1300℃に及ぶ高温度における

白金の輻射を研究し、そのほかにも多数の測定が続いて発表されている。H・F・ヴェーバーはこれらの人々や自身の実験結果を綜合して、従来欠けていた白熱電灯の理論を建設しようとして独特の分布式をつくったが、この式から彼は、のちのヴィーンのと同様な遷移則を見出している。当時レイリーはヴェーバーの分布式を賞讃したものである。しかしこれまた、のちの実験結果には裏切られてしまった。

ただここに注意すべきは、ミヒェルゾンの理論式にせよ、ヴェーバーの実験的分布式にせよ、黒体の概念を明確に使用しなかったことで、[4] この点は以前の実験家同様、理論的に不十分の感は否めない。

これから以後、プランクの式が決定的に認められるまでには十指に余る輻射の分布式が発表されているが、これと関連して永くその価値をもつのはW・ヴィーンの遷移則であった。



W. ヴィーン

一八九〇年から Reichsanstalt〔国立研究所〕の助手として、かたわらベルリン大学の私講師（一八九二―九六）を勤めていたヴィリ・ヴィーン Willy Wien は一八九三年二月九日"Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie〔黒体の輻射の熱理論第二主則に対する新しい関係〕"なる論文をベルリン学士院へ提出し、ヘルムホルツがこれを朗読した。[19] 当時は輻射そのものへ熱力学を適用することはまだ一般的には承認されていず、

ヘルムホルツその人もヴィーンの論文を見るまではかなり懐疑的な態度をとっていたし、ケルヴィン卿のごときは "Thermodynamics are going mad.〔熱力学がおかしなことになっていく〕" とまで極言したくらいであった。ただし若いヴィーンには熱の構成部分として輻射へ熱力学を適用しうることはほとんど自明であった。ここに見られる新旧学者の径庭は、熱力学の偉大な建設者にも歴史の遷移則は例外を措かないことを感ぜしめる。

ヴィーンは、巧妙な思考実験をもって空洞輻射へ熱力学を適用し、空洞の壁の一部がある速度で移動して一種の断熱膨張がおこなわれ、温度の変わる際にドップラーの原理によって、壁で反射された輻射線の波長が変わることを利用して、最大輻射密度に相当する波長λ_mが絶対温度Tに逆比例する（$\lambda_m T=\mathrm{const}$）という有名な Verschiebungsgesetz（遷移則）を導くことができた。これはのちにも種々の証明がおこなわれ、ほとんど疑う余地のないものである。

輻射密度ρと、波長λ、温度Tとの関係を決定することはもはや熱力学のみからではできない。ヴィーンは前述のミヒェルゾンの考えを少し改良して、まえの熱力学的研究の結果たる、$\rho_\lambda=\frac{1}{\lambda^5}f(\lambda T)$ の函数〔関数〕形を $\rho_\lambda=c\lambda^{-5}\exp\left(-\frac{b}{\lambda T}\right)$ と決定した。これがヴィーンの分布式である。

Reichsanstalt〔国立研究所〕の物理部の熱輻射研究が緒についたのもこのころ（一八九四）であった。電灯照明の普及にともない、O・ルムマーとF・クルルバウムは一八八四年のパリの国際会議の議決に基づき光度の「実用」単位として白金の融解点における輻射を、ボロメーターを作って研究中であった。この単位は実用というよりはむしろ政治的・個人的理由から提唱されたもので、当

時の実験技術では実現困難なものであったから、一八九三年シカゴで開催された電気学者会議では、ヘフネル－アルテネックが発明した Amylazetat Lampe〔酢酸アミル・ランプ〕に帰ることになり、ヘルムホルツもこの会議に出席したのであったが、Reichsanstalt〔国立研究所〕ではその物理的重要性から研究を継続させたものと思われる。

この研究と密接な関係があるのは、冶金工業への応用を主な目的とし、「加熱面での熱の通過という技術的問題を動機として」開始されたルムマー－ヴィーンの黒体輻射の実験的研究である。[20] 彼らは研究の出発点で明晰な理論的態度で次のように研究の方向を定めた。「技術にも科学にも均しく重要なこの問題を、非難の余地なく解答しえんがためには、まず絶対的黒体の輻射を研究し、そこでこの理想的黒体にかわるべき方法を見出さねばならぬ。[21]」彼らが実現したのは、ほとんど閉鎖した熱平衡にある空洞で黒体を近似することであった。これはそのほかにもおこなわれていたことであったが、輻射の研究に〔これを〕十分理論的な見地から用いたのは彼らが最初であった。実験の困難は十分精確なボロメーターを作ることと、高温度の安定した光源を得ることにあったが、ヘルムホルツは簡単な装置で実験することを好んだので、まず開始された全輻射に関するシュテファン－ボルツマンの法則の検証でも高温輻射体を得るため瓦斯の焔で加熱したため温度が安定しないで苦しんだそうである。

ヘルムホルツが死んで（一八九四）、ベルリンの数学物理学界もさすがに寂寥を免れなかった。かつてヴァイエルシュトラース、クロネッカー、クムマー、キルヒホフらを擁して華やかなりしベルリン大学も昔日の俤は偲ぶによしなきこととなった。国立研究所ではコールラウシュがあとを襲

い Präsident〔総長〕となった。ヘルムホルツは学問の自由に対しては彼のベルリン大学総長就任演説(22)でも知られるように高い見識をもっていたし、何よりも彼の巨大な権威によって国立研究所でも純物理学的研究がおこなわれえたのに対し、コールラウシュの力では政府当局の意のあるところを拒(しりぞ)けるわけにいかなかったし、また、ビスマルクにかわったヴィルヘルム二世その人は学術の振興に熱意を示したが、なにぶんにも時代は帝国主義段階へと転回し、国立研究所も以前のようにはいかなくなった。それらの事情でヴィーンは、前述の輻射分布式を置き土産に一八九六年アーヘン大学の招聘を受けて Reichsanstalt〔国立研究所〕を去ったので、実験はルムマー－プリングスハイムの手で続行された。

ところが黒体の全輻射の研究は、シュテファン－ボルツマンの法則が常温から1300℃近くまでの範囲で数%の精度で検証されたので一段落となり、前述の白金や、冶金への応用を顧慮して鉄および鉄酸化物の輻射能や赤熱の最低温度等の研究の方向へ進んだのに対し、スペクトラルな分布は、最初はボロメーターの種類で異なる結果が出たりしてなかなか困難であったが、ボロメーターがしだいに改良され、一八九八年には電気炉が採用されて、実験は進捗し、輻射のスペクトラルな分布はヴィーンの公式で「よく再現される」と認められた。

しかし間もなく、ベルリンの Königliche Porzellan Manufaktur（王立磁器製造所(23)）で新たに製作された耐火物を輻射空洞として採用するに及び、「実験物理学は1600℃近くまで任意の精度で『黒体』輻射を供する手段を備えるに至り」、全輻射公式や遷移則が精確に検証されたにかかわらず、ヴィーンの分布式とは多少の偏差が見出された。しかし輻射の可視範囲では比較的波長の大きい赤

色（〇・六五μ附近）でもヴィーンの式は、今日の進歩した実験技術でも検証困難なほどの微小な偏差をしか示さない。そこで不可視のとくに赤外線波長の領域でさらにルーベンスの Sylvin プリズムを用いたり、のちには一八九七年、ルーベンスが発見した[24] Reststrahlen（残留線）の方法で約5μの長波で実験したところ、ヴィーンの公式によれば一定波長において輻射密度と絶対温度の逆数$1/T$の関係が直線となるべきものが、実験結果は$1/T$に対して明らかな凸状の曲りが見られた。ここでついにヴィーンの分布式の変更が提案され、ついでプランクの画期的研究の登場となるのである。

一方「加熱および照明工学への応用」は、「光源の経済についてなんらかの判断」を得ようとする要求による白熱電灯の炭素繊条のスペクトラルな輻射能の研究や、今日冶金技術に広く用いられているホルボルン-クルルバウムの光学高温計の製作等に及んだ。

かようにして、熱輻射研究がたどった経路を反省するとき、われわれは、量子論提唱の実験的基礎が、その発生の当初、きわめて密接に工業技術的な——そしてこれを通じて間接には政治経済的な——状勢に〔いかに〕依存していたかを洞察するのである。それゆえ、われわれにとっては、量子論が、のちに発見された単純な量子的現象についてではなく、熱輻射論の複雑な演繹中に発見された事実も、必ずしも不思議ではなく、また、それが、英国やその他の国ではなく、まさに一八九〇年代に飛躍的な発展をとげた当時のドイツにおいてであったこともまったくの偶然ではないのである。

（1）理論的に精確な表現は、坂井卓三博士の好著「熱輻射」岩波講座物理学、ないしプランクの *Wärmestrahlung* に見られたい。なお、科学名著集2・キルヒホッフ「発散及吸収論」の序に熱輻射論の史的発展を叙せられた長岡半太郎博士の卓抜なる文章はわが物理学界の先覚の言葉として今に教えられるところが多く、以下にも引用した。

W. Gerlach, Theorie und Experiment in der exakten Wissenschaft, *Naturwiss.* 24, S. 712—741 (1936) (M. Hartmann u. W. Gerlach: *Naturwissenschaftliche Erkenntnis und ihre Methode* (1937) に収められている) も熱輻射論史に示唆的な論述である。

（2）Scala graduum caloris et frigoris, *Phil. Trans.* (1701)

Opuscula mathematica. (1744) T. 2, p. 422

（3）*Du calorique rayonnant*, Paris (1809)

（4）Philipp Gustav von Jolly（一八一〇—八四）一八四六年ドイツの大学としては最初の物理学の研究室がハイデルベルク大学に設けられ、その教授であった。George Quincke, *Geschichte d. physik. Instituts d. Univ. Heidelberg*, Heidelberg (1885) による。

（5）ブンゼンは彼の弟子カートメルとともに混合物の焔を色硝子で分けて見ることを研究していた(ボルツマンによる)。

（6）すでにこれより一〇〇年も以前からスペクトラムの利用はしだいに学者の注意をひくようになっていた。しかしトーマス・メルヴィル（一七五三）も、キルヒホフより約三〇年前のブルースター、ハーシェル、トールボットも、デーヴィが証明したように空気中に Common Salt がある点に十分の注意を払わなかった。この点において化学者ブンゼンを共同研究の相手に得たキルヒホフは恵まれていた。

（7）*Gilberts, Ann.* 56, p. 264—313, 1817, *Denkschrift d. kgl. Akad. d. Wiss. i München*, Bd. V. 1817 (für 1814 u. 1815) もしくは *J. v. Frauenhofers Gesammelte Schriften*, München, 1888。

（8）Foucault; *Arch. d. Sciences Phys.* X. p. 223. 1849; *Bull. de la Société Philomatique* 7, Feb. 1849

（9）*Phil. Mag.* 19 (1860) p. 193 とくに p. 198—199。

（10）W・トムソンがG・G・ストークスがキルヒホフより一〇年もまえにすでに暗線を太陽の雰囲気の吸収として説明を与えて、ケルヴィンは何年もそれを講義していたことを指摘してその Priority を主張したが、ストークスのはまったく実験ではなく、むしろ推説であったし、印刷もされなかった。ストークス自身、“I have never attempted to claim for myself any part of Kirchhoff's admirable discovery, and cannot help thinking, that some of my friends have been ever zealous in my cause” といっている。G. G. Stokes, Prof. Stokes

on the early history of spectrum analysis, *Nat.* 18, p.188—189 (1876)

(11) キルヒホフは将来古典物理学の基礎を変革するような実験事実が見出されうるとは信じなかった (Schuster)。光の電磁論は進歩とは見られないともW・ヴィーンに語ったそうである。

(12) G. Kirchhoff ; *Pogg. Ann.* 109, S. 275. (1860) *Untersuchungen über das Sonnenspekrum und die Spektren der chemischen Elemente*, Berlin (1861) 中にも含まれる。なお *Gesammelte Abhandlungen* および *Ostwald Klassiker*, Nr. 100 にも収められている。

(13) キルヒホフの investigator としての天資は、initiate するのでなく complete するのであった。

(14) もちろん、先進国たるイギリスにも、たとえばレイリー卿が正当にも指摘したごとくにキルヒホフと同じころ（一八五八）、同様の題目を発表したバルフォアー・ステュアートらの業績もないではなかったが、ドイツに一籌を輸したことは争われない。Stewart, *On Heat*, Oxford (1888) 参照。

(15) J. Stefan, Über die Beziehung zwischen der Wärmstrahlung und Temperatur, *Wien. Ber.* 79, Bd. 2, Abt. S. 391—428 (1879)

(16) L. Grätz (1880), Ch. Rivière (1882), W. Siemens (1883—84)
W. de W. Abney & Col. Festing (1883—87). J. F. Bottomley (1885—92)
W. Ferrel (1889), J. Edler (1890). A, Schleiermacher (1885—88)
W. de Conte Stevens (1892) 等。

(17) *Wied. Ann.* 22, S. 291 (1884)

(18) ボルツマンはヴィーデマンから注意されたが、[5] 黒体という点が[6]十分精密に betonen〔強調〕されなかったので、ボルツマンはシュテファンの四乗則をただ観測によく会うといっている。

(19) *Berl Ber.* S. 55 (1893) これは他の黒体の論文とともに *Ostwalds' Klassiker.* Nr. 228 (1929) に収められている。当時のヴィーンの回想は Willy Wien, Leipzig, Barth (1930) 中の自伝 (S. S. 16—18) による。

(20) これらの引用は当時の *Zeitschrift für Instrumentenkunde* に毎年発表された Reichsanstalt の Tätigkeit の報告からとった。

(21) W. Wien u. O Lummer, *Wied. Ann.* 56, S. 451. (1895)

(22) Helmholtz, *Über die akadimische Freiheit der Deutschen Universitäten* (1877), *Vorträge und Reden II*, S. 191

(23) 耐火物や炉材が熔鉱、製鋼炉に用いられ、重工業の文字どおりの母胎であることは知られているが、近世初期にはヨーロッパの諸王は当時珍重せられた東洋の工芸品を模倣して工芸品としての陶磁器を生産して、収入の一部とするために、王立の製造所を経営するものがあった。このベルリンの王立磁器製造所はかのフリードリヒ「大王」が、この流行政策にしたがい、一七六三年民間から買い上げて経営を始めたもので、今日なお世界に名声を保っている。

(24) H. Rubens u. E. F. Nichols, *Wied. Ann.* 68, S. 418 (1897)

〔1〕選集版では「これ」。

〔2〕選集版では「J. Stefan が全輻射密度が…」。

〔3〕選集版では「……考察者……」。

〔4〕選集版では「……使用せず、」。

〔5〕選集版では「……注意された。」とあり、「黒體……」以下改行となっている。

〔6〕選集版では「……といふ點から……」。

§4　プランクの量子仮説の提唱

マックス・プランク[1] Max Planck（一八五八—一九四七）は十七歳にしてミュンヒェン大学に学んだが、つづいてベルリンに学び（一八七七—七八）、親しくヘルムホルツ、キルヒホフおよびヴァイエルシュトラースの教えを受け、有名なクラウジウスの（とくに熱力学の第二主則に関する）論文を知って begeistern され〔感銘を受け〕、ミュンヒェンでの Dissertation〔学位論文〕（一八七九）も "De secunda lege fundamentale doctrinae mechanicae caloris（力学的熱理論の第二主則について）" であった。この一般的研究ののち、彼は溶液論その他の特殊問題に向かったが、キール大学在任中に著したゲッティンゲン大学の懸賞論文 "Das Prinzip der Erhaltung der Energie〔エネルギー保存の原理〕"（一八七七）は有名である。ヘルムホルツの信頼が篤かったので一八八九年には、キルヒホフの死後、ヘルツもボルツマンも辞退したため、その後任の意味で、新しく設置されたベルリン大学の理論物理の Institut〔研究所〕へ員外教授として招かれた。[2] 一八九二年正教授に進み、ついで学士院へ選出されるに及んで、ベルリンの物理学協会での交際は、Reichsanstalt〔国立研究所〕の研究者たちとも連絡を得、彼の従来の研究方面とも相俟ち、当時、学界の興味をひ

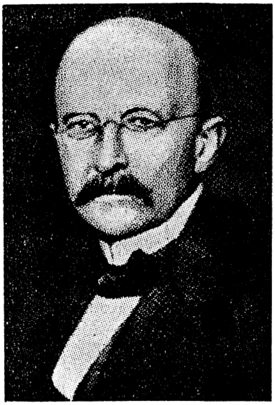
いていた熱輻射論の問題に赴くことになった。[3][4]

プランクはキルヒホフが提出した問題、すなわち、物質の特殊な性質によらない輻射の普遍函数〔関数〕を決定するには、古典電気力学をヘルツの直線〔線形〕振動体に適用し、十分一般的に取り扱えばよかろうと考え、まず「共鳴による電磁波の吸収および発射」から手を初めた（一八九六）。その結果、輻射線のエネルギーのかわりに共鳴体のエネルギーを置き換えて問題を簡単にすることができたが、目的を達するにはなおいまだ「本質的な連絡項が欠けている」ことがわかってきた。しかしすでにこの問題の取扱い方には当時の彼の方法論上の立場が明白にあらわれている。すなわち、ともすればこの振動体のような要素的存在の力学的機構について揣摩憶測に耽りがちなものであるが、プランクはこの共鳴振動体にはほとんど何も特殊な機構を仮定しなかった。かえって彼が強調したところによると、熱力学的考察では、すべて急激に不規則に変化交替する過程の個別相は問題でなく、「粗視的 makroskopisch な」観測で示されるものだけが問題であった。[5] 当時彼は気体運動論に万服の信頼をもってはいなかったし、[6] ローレンツの電子論（一八九二）を用いれば簡単となるべきものを、やはりこれを顧みないで迂路をとった結果にもなった。このプランクの方法論に関連して興味ある一つの挿話がある。

一八九一年ハレで開かれた学会でプランクは、有名な化学者でありエネルギー論の鼓吹者であったW・オストワルトと並んで、原子論的立場の闘士であったボルツマンに反対し、Atomistik〔原子論。エネルギー論に対立するものとしての〕について論争した。[7] このとき三人の論戦〔が〕白熱したあまり、ボルツマンは「エネルギー自体が原子的に分割されていないという何の理由があろうか」

と言い放ったそうである。オストワルトは、そのときはもちろん誇張として笑ったが、心中この思想の大胆さに打たれて永く忘れることができなかったと告白している。[8]（もっともプランクがこのとき何と評したかはオストワルトの記憶にもないが、エネルギー論と原子論が量子論によって総合されたのは科学がその必然的な摩擦のなかにも平和的解決をもたらす例だというオストワルトの意見は、やや皮相な見方であろう。[9]）

ところが数年を経て一八九五年の秋、リューベックの自然科学者大会では、Energetik〔エネルギー一元論〕の精神を鼓吹するオストワルトの「科学的唯物論の克服」に対し、このたびは、プランクは、ボルツマンとともに、彼の独自の立場からではあるが反駁を試みている。[10]プランクによると、力学的 mechanisch な自然観には限界 Schranke はあるが、それは深刻な、ある程度まで非常に困難な研究によってのみ解決さるべきものである。これに反し、Energetik のような、外見上普遍性をもちながらじつは空疎な主張は、たとえ矛盾は生じないとしても、それは「その概念が曖昧なために、経験で検証されうるような新しい結果を全然出させないからである」と断じ、「自己の存在を防衛するために現実の問題を避け、経験の武器でいかんともできない形而上的領域へ逃避するような理論によって初学者がディレッタント的迷想に耽ることを戒めるのは自分の義務である、よろしく偉大な先人の真摯な業績に沈潜して根本的に研究すべし」と説いたが、後年の彼の面目



M. プランク

はすでにここにも躍如としてあらわれている。アインシュタインはのちにプランクを讃えてこの論説に言及し、「真摯な科学的思索の同志は何人も、ここで反撃されたような（Energetik 流の）論文を読過する際にほとんど抑えることのできない憤懣を、この清新な小論の講説によって慰やすことができる」[11]と述べ、また、ゾムマーフェルトは、「プランクの科学的人格性は熱力学に根ざすが、しかもこのリューベックの学会では、一見エネルギー論を弁護しそうなプランクが、よくその弱点を指摘したのは、彼が原子論的方法へ内面的転向を完成する以前〔のことである〕だけに、とくに興味がある」と書いている。[12]

さて、ヴィーンの分布式を実験的に検証したハンノーファーの Technische Hochschule（工業大学）のパッシェンとH・ヴァンナーの結果、[13]ならびに Reichsanstalt のルムマー－プリングスハイムの結果[14]は、ある程度までその分布式を裏書きするかに見えた。そこで〔プランクが〕共鳴体のエントロピーのエネルギーに関する第二次微係数の逆数$\boldsymbol{R}$がエネルギーに正比例するという**簡単**な仮定と遷移則とからヴィーンの分布式が導かれるのを見出したとき、これこそ正しい法則であるとして熱心にそれを支持したのも無理はなかった。プランクは当時この「簡単性」をしばしば強調した。[15]のちにも「全問題は一つの普遍的自然法則に関するものであり、かつ自分は当時も今日もなお、自然法則はそれが一般的であればあるほど簡単であるという見解を身に徹して確信しているので、どんな定式化をより簡単なものと見るかという問いには疑問がないわけではなく、終局的に決定することはできないにしても、ともかく自分は一時は量$\boldsymbol{R}$がエネルギーに比例するという命題にエネ

ルギー分布則全体の基礎を看取すべきであると信じていた」と回想している。ここにわれわれはE・マッハが思惟経済の見地から「簡単性」を重視したことを想起するが、それがプランクでは理論的基礎づけの可能性を意味するものへ移行しつつある。しかして、のちに至ってプランクは当時を回想して、そのころ彼はなおかなり「現象論的に傾いていたから」、原子論的にエントロピーと確率との関係に立ち入って尋ねることをせず、上記の関係と経験的材料とを比較したにとどまったと告白している。

しかるに、英国の大物理学者レイリー卿 Lord Rayleigh（本名 John William Strutt）（一八四二―一九一九）は、プランクと見解を異にし、理論的見地から見るとヴィーンの分布式導来の根拠は「ほとんど推測 conjecture にすぎず」と批評し、上述（ママ）$T＝8$ の問題、とくに長波長高温度では（たとえば絶対温度1000°で60μ）ヴィーン式によると輻射密度の増加がほとんど停止するという実験で験証されうる難点を指摘して、分布式の変更を試みた。レイリーは得意の振動論から、まず立方体の箱に閉じ込められた空気の振動のアナロジーによって、振動数がνと$\nu+d\nu$とのあいだの固有振動の数を求め、各振動へ古典統計力学の帰結である**エネルギーの等配分則**を適用して、輻射密度がkT（kはボルツマンの常数）に比例するという、のちにいわゆるレイリー－ジーンズの式[16]を導いた。もっともこの式では短波に対して輻射密度が限りなく大きくなるからそのままではとうてい問題にならないので、理由は述べずに指数函数項を付加し[17]、この式が優れた実験家の手で速やかに検証されることを切望している[18]。

これに対しプランクは一九〇〇年春の論文[19]においても、当時しだいに喧（かしま）しくなってきた長波長に

おけるルムマー－プリングスハイムの結果とヴィーンの式との食い違いに対して、かなり苦しい弁解を与えなければならなかった。「観測と理論との衝突」は、異なる観測者の結果が一致して初めて疑いなく確立されるものであるが、ヴィーンの式についてはパッシェンのように一致するものもある。自分は計算方法を変えてもふたたびヴィーンの式に達したから、その正しさに対する自分の見解はさらにいちだんと確かめられたとプランクは称した。

ヴィーンの式が（ママ）温度が無限に高く（$T=\infty$）なっても一定の色で輻射密度が有限値に漸近するという難点に対しては、ヘルツ波と「自然的輻射」とのあいだには長短という「量的」な差違ばかりでなく、秩序性と無秩序性という「質的」な差違があるから、同じようには論じられない。一定波長のヘルツ波の強度は原理的に[1]国立研究所の研究者たちから実験の材料を供せられて、整理をした結果、前記のエントロピーの二次導函数の逆数 $1\Big/\frac{d^2S}{dU^2}$ は、実験と一致せしめるには、低温短波長のエネルギーが小さい場合には、すでに彼がヴィーンの式の演繹に用いたように、エネルギー U の一乗に、ルーベンス－クルルバウムの実験のごとく長波高温でエネルギーが大きい場合には U の二乗に、比例すると考えなければならぬことを見出した。そこで一般の場合には、もし「『簡単 Einfachheit』という点でヴィーンの式につぎ、しかも熱力学および電磁論のあらゆる要求を満足するまったく任意 ganz willkürlich」な式をつくり、それですべての観測結果を表現させようとすれば、上述のエネルギー U の一乗と二乗の項を加えた式を採用するほかはない。これから導かれる輻射式こそ、エントロピーをエネルギーの対数函数として与える（これは確率論から想像される）式のなかでも、「最も簡単な」ものであり、ヴィーンとレイリーの両式をも、それぞれ短波－低温、

長波－高温での極限として包含する。かようにして今日プランクの公式として知られる有名なる輻射式が半ば実験式としてではあるが導き出されたのであった。[20]

一九〇〇年十月十九日ベルリンの物理学協会例会の席上、F・クルルバウムはH・ルーベンスとともにおこなった上述の実験「黒体による長波の発射について Über die Emission langer Wellen durch den schwarzer Körper」を報告したが、当時の記録によると、[21] この講演につづいた活発な討論に際しプログラムの番外としてマックス・プランクが起って、「ヴィーンのスペクトラル分布式の一つの改良について Über eine Verbesserung der *Wienschen* Spektralgleichung」〔を〕講演した。ここに新世紀の物理学の誕生を先触れする有名なプランクの輻射式が発表されたのであった。

のちに重大な意義を獲得したこの発表も、それが実験式の域を脱せぬかぎり、彼自身が謙遜して言ったように「幸運にも見つけ出した内插公式」にすぎないとも考えられよう。その場合にはいかにそれが実験を精密に再現する便利な公式であっても、実験のデータそのものに対してはついに「数学的付録」以上でないとも言われよう。しかしながら、プランクが幾つかの数値を示してこの式が従来提出されていたティーゼン、ルムマーーヤンケ、[22] ルムマーープリングスハイムの式と「同様に満足に」観測結果を再現すると説明しながら、あえてそれに注目をうながしたゆえんはどこにあったか。それは彼自身も言うように、主として公式の簡単な構造、ことに共鳴子の振動ェネルギーとエントロピーとが「きわめて簡単な対数関係で表わされ、いずれにせよそれが、事実によって確かめられなかったヴィーンのを度外視すれば、従来提案されたあらゆる他の公式よりも一般的な解釈の可能性を約束するように思われたからであった」。そのゆえにこそプランクは、「この式を立

てたその日から、それに実在的物理的意義を見出そう」と、懸命な努力を開始したのである。もし単なる実験式に満足したならば作用量子の発見はプランクの業績とはならなかったであろう。単なる記述を超えて「現象に権威を与える」ことに！[2] まことに彼の直覚にたがわずこの輻射公式は輝かしい量子の世紀の序曲とはなった。

　プランクはこの十月十九日の講演で彼自身も述べたように、以前にあれほどまで熱心に支持したヴィーンの公式が正しくないとすれば、従来それを理論的に導いた彼の演繹のなかには、どこかに必然性を欠くところがあるに相違ないと考えた。その理由は「ますますもって容易に理解しがたく、いずれにしても証明は難しいと思われるが」、それは多数の共鳴子 Resonator の総エントロピーが[3]総エネルギーおよびその変化のみに依存するという仮定は、必ずしも以前に考えたような普遍性を有しないのではないか[23]と〔も〕疑い、[24]これからエントロピー式の修正を試みたのである。

　かような暗示から、プランクは一意〔に〕分布式の物理的基礎づけへと向かったが、問題は自らエントロピーと確率との連関の考察へ、すなわち、ボルツマン的 Ideengänge〔思考のすじ道〕へと彼を導いた。「余の生涯の最も緊張した数週間の研究ののち、ついに闇は明け、予感されなかった新たな遠望がほのぼのと見え初めた[25]」と感激にみちて回想される時期であった。

　いまや、以前に了解しがたかった個々の共鳴子のエネルギーの問題は忽然として明らかとなった。"Entropie bedingt Unordnung〔エントロピーは無秩序性を規定する〕"という力強い言葉が冒頭に響く。この「無秩序性」こそは、完全な定常状態にある輻射場においても、振動の時間よりは大きく測定の時間に比しては小さい時間間隔を考察するとき、共鳴子の振動がその振幅と位相とを変化

交替する不規則さから由来する。したがって、共鳴子が定常状態で一定のエネルギーを有すると言っても、じつは単なる時間的な平均値ないし多数の共鳴子のエネルギーの瞬間的平均値とも考えるべきものである。そこでこのエネルギーの配分を決定するには気体論の場合におけるボルツマンの方法を採用し、確率論を導入するほかはない。プランクはエネルギー配分の種々な組合せ方、ボルツマンのいわゆる「Complexion〔出現可能な微視状態〕」がいずれも等しい確率をもつことを核心的な仮説として強調した。

しかし、振動数νのN個の共鳴子にエネルギーU_Nを配分するにあたって、U_Nが無限に細かく分割できるとしては、無限に多くの仕方で配分ができることになるから、計算の手懸りは獲られない。これがためにはエネルギーを「**連続的で無制限に分割できるものではなく、diskret**〔離散的〕**な整数個の有限な等しい部分から合成された量として把握することが必要であり**[26]」「**これが全計算の本質的な点である**」。

プランクはこれを Energieelement〔エネルギー要素〕εと呼び、($U_N=P\varepsilon$) かれが単にボルツマンの場合のごとく計算の便宜上の有限量にとどまらず、これを最後まで有限にとどまらせたこと、これこそ科学史上にも稀な、実り豊かなる着想 Einfall とはなった[27]。なぜなら、計算の結果、これを無限小へ極限移行させればのちのレイリー-ジーンズの式に達するほかはないからである。

プランクはこのエネルギー要素εを新しい自然常数h（$=6.55\times10^{-27}$ erg. sec と彼はこのとき算出した）と共鳴子の振動数との積として与えたが、この確率計算の結果に、古典電気力学から算出された共鳴子の平均エネルギー $U_\nu=\frac{c^3}{8\pi\nu^2}\rho_\nu$ を合わせて、輻射密度ρ_νを決定し、これで彼の

輻射分布式の証明を完了した。これが今世紀初頭の大発見であり、理論的探究の尽きせぬ泉となった「量子」の誕生である。一九〇〇年十二月十四日なるドイツ物理学協会の例会における発表であった。[28][29]

まことにかかる偉大な発見は、学者として享受しうる類い稀なる幸運である。しかし、ローレンツがいみじくも言ったように、かような幸運は労苦多い探究と深い思索とをもってそれに値するものにのみ頒(わか)ち与えられるものでなくて何であろう。ゾムマーフェルトは、プランクのような Klassiker〔古典派学者〕がこのようなロマンチックな発見をしたのはまことに運命の戯れであると語ったそうであるが、プランクが当時ドイツの学界の重要問題であった熱輻射論を光の電磁論、熱力学、確率論と一歩一歩脇目もふらず事象の核心へ肉薄していった経過を顧みるとき、われわれはこの偉大なる世紀の羽搏(はばた)きをもはや運命の戯れとは言わないであろう。[30]

(1) プランクの伝記は Hans Hartmann, *Max Planck als Mensch und Denker*, Berlin (1938) 参照。これによると、プランクのドイツ的な敬虔な宗教性は著名な神学者であった彼の曽祖父から、厳正な論議は法律学者であった彼の父から由来しているのかも知れない。

物理学の師、Ph・G・v・ヨリーは、プランクの勉学の初めに、当時物理学がほとんど完成の域に近づき、どこかの隅に塵や泡を見つけて検討したり、整理する仕事はあるかも知れないが、物理学の体系全体としてはほとんど確実に建設されてしまっているという意味のことを語ったといわれる。ヨリーは、まさにこの弟子が彼の予想を裏切る大変革の創始者となろうとは夢想もしなかったであろう。

(2) 当時は理論物理学は正教授もきわめて少なく、プランクはこのためにかなりの期間を私講師や員外教授に甘んじなければならなかった。その間には彼も迷って、ヘルムホルツの門を叩いたこともあるが、時世の動きを高所から達観していた師は、理論物理の教授が将来必ず新たに増員されることを説いて弟子をさとしていた。ヘルツやボルツマン

はもとより、当時、彼より六歳も若く、一私講師たるヴィーンも、すでに着々と業績を挙げていたのに対して、ベルリン大学は淋しいとされていた。このことについてはボルツマンがアメリカで「自分が行っていたら」と話したことがあるが、プランクたるものかなり苦しい立場にあったといえよう。

(3) 以下、輻射法則の導来に至る諸論文は *Ostwald's Klassiker* Nr. 206 に収められている。なお当時の彼の研究ぶりについてはノーベル受賞講演 *Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie*, Leipzig (1920) 参照。本節の叙述もこれによるところ少なくない。これは *Physikalische Rundblicke*, Leipzig (1922) にも収められている。

(4) *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften* (Okl. 206), Die Ableitung der Strahlungsgesetzes (1923)

(5) H. A. Lorentz, Max Planck und die Quantentheorie, *Naturwiss*, 13, S. 1077 (1925)

(6) 八〇年代の初めころのことであろう、プランクは原子論と連続論とが将来生死を賭した闘争をおこなう時が来るであろうが、「結局においては原子論を棄てて連続的物質の仮定をとらねばなるまい」と書いたのであった (Hartmann, *Planck*, S. 112 による)。

(7) プランクはクラウジウスの熱理論の第二主則のために喜んで共鳴し、オストワルトの浅薄な Energetik と戦うべきであったのに、かえってボルツマンの敵手に引き入れられて原子論を排撃したことを遺憾としている (*Naturwiss*. 28, S. 778—779 (1940))。

(8) W. Gerlach もこの話を引用したが、エネルギー量子の Idee はボルツマンの書物のどこにも発展させられていないから、議論が熱した拍子の言葉らしいとしているが、これは必ずしもそうとは言えないことはあとで述べる。

(9) W. Ostwald, *Lebenslinien*, II, S. 116. f.

(10) M. Planck, Gegen die neuere Energetik, *Wied. Ann.* 57, S. 72 (1896)。同じ *Annalen* でこの論文の直前に L・ボルツマンが Ein Wort der Mathematik an die Energetik, S. 39—71 を発表している。

(11) A. Einstein, Max Planck als Forscher, *Naturwiss*. 1. S. 1077 (1913)

(12) A. Sommerfeld, *Naturwiss*. 6, S. 17 (1918)

(13) F. Paschen u. H. Wanner, *Berl. Ber*. S. 5. (1899)

(14) Lummer u. Pringsheim, *Verh. d. D. Phys. Ges*. 1, S. 23 (1899)

(15) たとえば M. Planck, *Über eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung* (ヴィーン分光式の一つ

の改良について＝一九〇〇年十月十九日講演）参照。

(16) まえに述べたように、この古典理論の当然の帰結である関係が、年代的にはヴィーンの式よりものちに英国の学者によって提案されたことは興味深い。プランクがこの式に迫りながらついに問題にしなかったのは、彼の身近にあまりにも明白な実験的事実があったからで、また彼の現実への感覚を物語るものであろう。

(17) $\rho_\lambda \propto \lambda^{-4} kT$ く指数函数を付加して $\rho_\lambda \propto \lambda^{-4} kT \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)$ とした。

(18) *Phil. Mag.* vol. 49, p. 539 (1900)。のちに *Nature*, April 13, May 16 (1905)、また J. H. Jeans. *Phil. Mag.* (6) 10, p. 91 (1905)。この指数函数のついた式も間もなく、ルムマー＝プリングスハイムの経験に合わぬとされた。Lummer, *Rapport Paris*, vol. II, p. 98. (1900)

(19) Entropie und Temperatur strahlender Wärme. *Ann. d. Phys.* Bd. 1, S. 719 (1900)

(20) ヴィーンの分布式は一乗に比例するとして（共鳴体のエントロピーをS、エネルギーをUとする）$1\Big/\frac{d^2S}{dU^2}=-bU$から〔の〕積分により〔、また$\frac{1}{T}=$〕$\frac{dS}{dU}$を用い、$U=a.e^{-b/T}$として導かれ、レイリー（ジーンズ）の式は二乗に比例するとして$1\Big/\frac{d^2S}{dU^2}=-\frac{U^2}{c}$から、$U=cT$の形に導かれる。そこで原の両式を加え合わせた$1\Big/\frac{d^2S}{dU^2}=-bU-\frac{U^2}{c}$とすれば$\frac{1}{T}=\frac{dS}{dU}=\frac{1}{b}\log\left(1+\frac{bc}{U}\right)$となり、これからプランクの式 $U=\frac{bc}{e^{b/T}-1}$ の形が出る（M. Planck; *Nobel-vortrag* による）。

(21) *Verhandlungen d. D. Phys. Ges.* 2, S. 181 このときはやはり輻射の研究家であるエミール・ヴァールブルクが座長であった。

(22) マックス・ティーゼンやヤンケは当時国立研究所にいた数学者である。

(23) いま考えている過程の初めに共鳴子のエネルギーUが定常的な値と $-\Delta U$ だけ偏れているとして、それがdUだ

け変化すれば、この（一つの共鳴子＋輻射場の）系の全体のエントロピー増加は $dU\Delta Uf(U)$ である。これを n 倍すれば（n 共鳴子＋輻射場の）系の総エントロピー増加になる。これはプランクの言うとおり差支えないが、左辺の $dUn\Delta Unf(Un)$ は、一箇の共鳴子について得られたエントロピー増加の式 $dU\Delta Uf(U)$ をそのまま形式的に n 箇の共鳴子の系にあてはめることで、これは正しくない仮定である。

いま $U_n=nU$ とすれば、上の式から $nf(nU)=f(U)$ となるが、この函数方程式の解は $f(U)=\text{const.}/U$ である。ところが $f(U)=-\frac{3}{5}\frac{d^2S}{dU^2}$ であるから、

$$\frac{d^2S}{dU^2}=\frac{\text{const}}{U}$$

とも書ける。そこで b は正の常数とし、$\frac{d^2S}{dU^2}=-\frac{1}{bU}$ とすると、積分して

$$\frac{dS}{dU}=\text{const.}-\frac{1}{b}\log U$$

そこでテキストに引いた第二主則の形式 $\frac{dS}{dU}=\frac{1}{T}$ を利用し

$$U=a.\,e^{-b/T}\ (a：常数)$$

を得る。ところが電磁論の輻射束密度は

$$\mathfrak{R}_\nu=\frac{\nu^2}{c^2}U=a\frac{\nu^2}{c^2}e^{-\frac{b}{T}}$$

ヴィーンの変位則により

$$\mathfrak{R}_\nu=\frac{\nu^3}{c^2}F\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

ゆえに a と b とは振動数 ν に比例する $(a=A\nu,\ b=B\nu)$。

$$\mathfrak{R}_\nu=A\frac{\nu^3}{c^2}e^{-\frac{B\nu}{T}}$$

これはヴィーンの分光式にほかならない。ν の代りに $\lambda=\frac{c}{\nu}$ とすれば、

$$E_\lambda d\lambda=\mathfrak{R}_\nu d\nu$$

$$E_\lambda=\frac{Ac^2}{\lambda^5}e^{-Bc/\lambda T}$$

という見慣れた形になる。

(24) のちには、この点が本質的なのではないことが判明したが、ともかくかような疑問が、具体的な統計的考察をおこなわせ、大発見へ導いたことは真実である。なお、坂井卓三氏　熱輻射一一七ページ参照。

(25) M. Planck, Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quautentheorie (Nobelvortrag 1921) *Physikalische Rundblicke*, S. 154 (1922) 参照。

(26) *Ann. d, Phys.* 4, S. 553 (1901) "Hierzu ist es notwendig, U_N nicht als eine stetige, unbeschränkt teilbare, sondern als eine diskrete, aus einer ganzen Zahl von endlichen gleichen Teilen zusammengesetzte Grösse aufzufassen"

(27) このエネルギーの連続仮定に立つ古典論との折衷が、後に問題となった。§6参照。ソルヴェイ会議（一九一一年）および *Verh. d. D. Phys. Ges.* 16. S. 820 (1914)。

(28) プランクの輻射式を展開すると

$$U_\nu=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}=\frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\left(e^{-\frac{h\nu}{kT}}+e^{-\frac{2h\nu}{kT}}+\cdots\cdots\right)$$

ヴィーンの分布式と同形な各項は $h\nu$ の整数倍を含んでいる。もし右辺から出発すればこれも Energieelement の構想に暗示するものがあろう（坂井卓三教授の御注意による）。プランク自身、この展開式を h の数値計算に利用し、また、のちにアインシュタインは熱平衡の場合の平均エネルギーの式として右辺の構想から出発している。

(29) 当日プランクはまず Über das sogenannte *Wien*sche Paradoxon について話してから、この zur Theorie des Gesetes der Energieverteilung im Normalspektrum を報告した。前者は[4]、ヴィーンがニコルプリズムを二つの黒体のあいだに置いてパラドックスを生じる思考実験を提出しているが、ヴィーンが未知の現象で補償されるとしたのに対し、プランクはそれに反対し、十一月二日の例会で Einen vermeintlichen Widerspruch des magneto-optischen Faradayeffektes mit der Thermodynamik を報告し、矛盾でないことを証明したが（*Verh, d. D. Phys. Ges.* 2, S. 206. 1900）、それを補足したものである。プランクも十月から十二月にかけて必ずしも輻射式にのみ没頭していたのではないことがわかる。誇張した想像を防止する意味で付け加えておく。

(30) プランクの業績に対する礼讃は *Die Naturwissenschaften,* 6, Heft. 17 (1918) のマックス・プランク六〇歳誕生記念号および同誌 17. Heft. 26 (1929) プランク学位五〇年記念号を参照されたい。

〔1〕 選集版のこの部分には脱落があると思われる。天野「熱輻射論と量子論の起原（昭和十八年、大日本出版）」、六三―六八ページ参照。すくなくとも、つぎのように補う必要がある。「一定波長のヘルツ波の強度は原理的に〔は限度がないが、熱輻射線のそれは一定限界を超えられないのであろうと、プランクは書いている。しかし、同じ年のうちにプランクは、〕国立研究所の……」。

〔2〕 選集版では「ことにし、」。天野の前掲書、七二ページにより校訂。

〔3〕 選集版では「……総エントロピーは……」。

〔4〕 選集版では「これは……」。

§5　光量子仮説——その応用と批判

ケルヴィン卿は、二十世紀初頭の物理学の地平線にただよう二つの暗雲として、マイケルソン－モーリイの実験と熱輻射の問題を指摘した。しかし、後者に対するプランクの、文字どおり画期的であり開拓的である研究も、発表後数年間というものはその十分な意義を認識されるに至らなかった。[1] ことにその功績の核心たる、エネルギー要素の仮説にいたっては、学界一般にはもちろん、プランク自身にもその革命的重要性が隠されていた。[2] ところが一九〇五年に至って突然、意外な方面からふたたび取り上げられることになった。

光の波動論はヤング、フレネル以来、急速に学界にその揺るぎない地位を確立し、マクスウェル、ヘルツを経てもはや論議の余地もない定説となった。ハインリヒ・ヘルツは一八八九年ハイデルベルクの自然科学者・医師大会における有名な講演「光と電気との関係について」のなかで、光の波動性を強調し、「われわれはその波動の速度を知り、その波長を知り、それが横波であることを知り、一言にしていえば運動の幾何学的関係を完全に知っている。これに対する疑惑はもはや不可能であり、この見解の反駁は物理学者には考えられない。光の波動論は、人間的に言えば、確実なも

のであり、これから必然的に導かれることも確実なものである」と断言した。

ところが、このヘルツ自身の電磁波の発生および伝播に関する有名な一連の研究のなかの「電磁放電に対する菫外線〔紫外線〕の作用について[3]」の実験（一八八七）を出発点として研究を開始した彼の弟子P・レーナルトは、この現象の本質が光電的に発生した陰極線にほかならないことを確かめた[4]（一八九九）。他方ヘルツの最後の実験的研究となった「陰極線の薄い金属層の通過について[5]」（一八九二）が、一八九四年ヘルツが三十七歳で早世して後、やはりレーナルトの手で継続され、これがのちにJ・J・トムソンの電子の発見へ導き、前者と相俟って、ヘルツは自らの手で、己が完成したばかりの電磁的世界像を揺るがし、次代の研究者を新しい建設へ導く結果となったのである[6]。

レーナルトは研究を進めて、光の投射によって金属面を逸出する光電的陰極線（すなわち光電子）の最大速度は、励起する光の強度に影響されず、単に逸出する電子の数がそれに比例するのみであること、速度は励起する光の振動数（およびその金属の性質）によるという注目すべき結論を得た[7]。これは、同じくレーナルトが詳細に検討した Fluorescence〔螢光現象〕等に関するストークスの法則と同様に、光の波動論をまったく困惑させる事実である。

波動論の立場からすると、光の強度は、一定の振動数に対しては振幅の自乗に比例し、一定振幅では振動数に正比例するのは事実であるが、いずれにせよ強い赤や赤外線が微弱な菫外線よりもはるかに大きなエネルギー密度をもちうることは争えないことである。しかるに光電効果では強い赤外線も、微弱な菫外線の前には無力である[8]。波動論的に考えると、きわめて微弱な菫外線が電子逸出のエネルギーを与えるには、稀薄な球面波となって空間に瀰漫（びまん）したエネルギーが個々の電子に蓄

積される必要があるが、このようなことは波動論ではまったく不可解である。

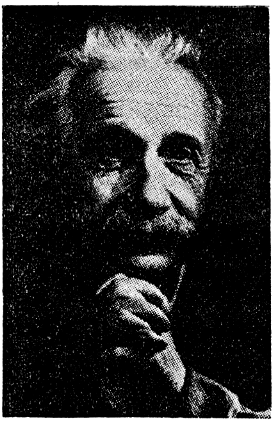
この問題にきわめて天才的な解決を試みたのはスウィスのベルンの特許局の技師をしていた当時二十六歳の青年アルベルト・アインシュタイン Albert Einstein（一八七九 3/14—x（一九五九 4/18））その人であった。彼は一九〇〇年チューリヒの Polytechnikum〔工科大学〕を卒業したが、彼の理論的素養は、ここの物理の教授H・F・ヴェーバー（§3熱輻射の理論的・実験的研究参照）や数学のA・フルヴィツ、N・ミンコフスキよりもむしろ自宅でキルヒホフ、ヘルムホルツ、ボルツマン、ドルーデらの著書に沈潜することによって得るところが多かったと言われ、マッハやヒュームにも傾倒したようである。[9] 一九〇一年以来、*Annalen der Physik* に数篇の論文を発表していたが、それらは必ずしもまだ彼の天才をあらわすものではなかった。ただその多くが熱力学の第二主則の分子論的取扱いであったことは、プランクの場合と対照して多少興味がある。が、いずれにせよいまだ無名の学徒にすぎなかったのである。

しかるに一九〇五年は「blitzartig〔電撃のよう〕」に驚嘆すべき彼の天才が次々に発揮された年であった。三月には光量子論について、[10] 五月にはブラウン運動について、[11] 六月には相対性原理について、[12] そのいずれの一つも不朽の歴史的意義をもつ独創的な論文を *Annalen der Physik* に送った。その光量子論を創唱したのは「光の発生と変脱に関する一つの発見法的見地について」と題する論〔文〕である。

アインシュタインはこの論文のなかで、まず気体その他の可秤的な物体の理論的表象と、真空中の電磁現象に関するマクスウェルの理論とのあいだには、原子的と連続的、有限個の量で状態が決

定されることとしからざることとの深刻な形式上の対立があることを指摘した。従来、純光学的な現象では、連続的な空間函数を用いる光の波動論 Undulationstheorie が見事に確かめられて他説をもってかえることを許さなかったが、これらの光学的現象がいずれも時間的平均値であって、瞬間値に関するものではないから、光と物質との交互作用すなわち光の発生・変脱の現象へ適用すれば、矛盾を生じないものでもない。

実際、黒体輻射、Photoluminescence〔光ルミネセンス〕、菫外線による陰極線の発生等の現象は、むしろ「光のエネルギーが不連続的に空間へ分布されている」という仮定、つまり一点から発した光のエネルギーは「分割されずただ全体としてのみ吸収または発生される有限個数のエネルギー量子 Energiequantum となって空間的に lokalisieren〔局所化〕されて運動する」という仮定によって、より優れた理解を得るものと思われる。かように、アインシュタインはきわめて大胆な方法論的考察から出発している。


A. アインシュタイン

彼は、プランクが輻射を「考えうる最も無秩序な過程」としてマクスウェルの理論から導いて彼の輻射論の基礎とした共鳴子の平均エネルギー $E_\nu = \frac{c^3}{8\pi\nu^2}\rho_\nu$ は、じつは Elementarquanta〔素量子〕とは無関係なもので[13]、もしこれにエネルギー等配分則を適用すれば、レイリー＝ジーンズの式に導く[14]ので、経験と一致せず、振動数の全範囲をとるとエネルギー密度は無限大となるとい

う理論上の困難を含むから、エネルギー密度が大きくて長波長の場合にしか役に立たないことを指摘した。

次に輻射密度が小さく、波長の短い場合、すなわちヴィーンの式の成立する範囲では、単色光はあたかもたがいに独立な Energiequanten〔エネルギー量子〕から成り立つという結論になることを示した。そこでこれによって、従来波動論ではとうてい理解できなかった前記の諸現象を見事に説明することができた。そのなかでも光電効果について彼の導いたいわゆるアインシュタインの公式は、レーナルトやシュタルクの実験結果を利用して数値的評価も与えてあるが、のちにミリカンらの手で厳密に確かめられた[15]。

この画期的論文の意義を評価するにあたってとくに注目せねばならないのは、プランクの場合には単に計算上本質的な仮定であった Energieelement〔エネルギー要素〕が、ここでは輻射式の演繹の過程から解放されて積極的に物理的意義を与えられ、空間的に粒子化され、天馬空をゆくというような縦横の応用を見出した点である。ただし、プランクの普遍常数 h があからさまには用いられていないが、これはアインシュタインが分子論的見方とのアナロジーに終始したためである。

つづいて彼が発表した論文[16]では、プランクの輻射論はマクスウェルの理論と矛盾する一つの新しい仮説――光量子仮説 Lichtquantenhypothese――を物理学へ導入したことになるということを説明し立証する点に力がおかれているが、われわれがその文章から、それまでプランクの演繹中に埋もれていた光量子をアインシュタインが初めて注目し、生命の息を吹き込んだという感を抱くとしても、これはアインシュタインの自負誇張した書き方ではない。それほど当時の学界一般にはこの光

量子は異常なものであったのである。

プランク自身、とうていこのような大胆な仮定には進めなかったのであって、一九〇五—六年のベルリン大学の冬学期の講義といわれる有名な「熱輻射論」の第一版でも、古典家としての彼らしい非常に慎重な態度で書いている。[17] すなわち、輻射式の演繹では Energieelement を用いれば「より速やかに容易に schneller und bequemer」目標に達するといい、エネルギーと時間との積の次元をもつ新しい普遍常数 h を、その次元から、最小作用の原理にならって作用量子または作用要素 Wirkungsquantum oder Wirkungselement と呼んだ。(これは相対論的不変量である点でも Energiequantum より基本的でなければならぬ。) 彼は「この常数 h が要素的振動過程において、発射中心で或る役割を演じていることはほとんど疑いがないが、その電気的方面からの基礎づけには、われわれの従来の理論はなんら詳細な拠りどころを供しない」と述べているが、古典力学ないし電気力学と矛盾するものとまでは考えていなかったようである。

したがってアインシュタインの相対性理論の発表には、ただちに賛意を表して推賞し幾多の論文を発表したプランクではあったが、かえって光量子説には控え目な態度で、その後も数年間というものあまり立ち入った意見を発表していない。

アインシュタインが一九〇五年に発表した他の二つの学説のうち、相対性理論はあまりにも有名である。[18] 彼が当時、理論物理学界の最大の難問たる、マイケルソン－モーレイの実験と運動の相対性の矛盾に直面して、同時性の定義の物理的可能性を反省し、ついにニュートン以来何人も指を染めなかった空間・時間の大変革へと進んだこと〔は〕いまさら詳説を要しない。しかし従来永久の

真理と考えられてきたニュートン物理学の理論的基礎を震撼することによって、他方に原子論に関する目覚ましい幾多の発見と相俟って、物理学の基礎変革の問題に広大な展望と力強い刺戟を与えたことは、形の上にあらわれぬはかり知れない影響があった。その方法論的態度において、二十年後の量子力学にも模範的な影響を及ぼしたし、特殊相対性理論の一つの結果として得られた質量とエネルギーとの関係も、原子物理学で重要な役割を演じることになった。

ブラウン運動の理論は、間もなく独立に発表されたスモルコフスキの理論[19]とともに、ペラン[20]その他の人々の手で検証され、それが分子の存在の決定的証拠となって、いっさいの原子論の懐疑と非難とを一掃したことはこれまた周知の事実である。この理論はさらに揺動の問題として量子論的応用をもつのであった。

一九〇九年アインシュタインはチューリヒ大学の員外教授に招かれて冬学期から開講することとなったが、それに先立ち九月にザルツブルクで開かれた第八十一回ドイツ自然科学者・医師大会に出席し、初めてドイツの多くの学者と顔を合わせることになった。

この大会では相対性理論に対する論議が喧しかったが、アインシュタインの「輻射の本質と構成に関する吾人の見解の発展について」と題する講演は、その大胆にして高邁な識見を盛った内容によってとくに学者の注目をひいたものであった。彼は、波動論を襲った実験的事実の急激なる嵐によって「理論物理学の来たるべき発展段階は、光の波動論と Emissionstheorie〔粒子発射論〕の融合のごとく解せられる光の理論をもたらすであろう」と冒頭し、まず相対性理論について絶対静止のエーテルの仮定が廃棄さるべきこと等を述べたのち、相対論によると、光は発射する物体から吸

収する物体へ惰性質量を伝達する点で、光の粒子説 Korpuskulartheorie と特徴を一にすると指摘した。

彼の個人的意見ないし考究によると、光の発射の可逆性その他、既述の諸問題は、要素的過程として、従来の波動論では不可解な点から見て「ニュートンの Emissionstheorie がより多く真理を含蓄する」。光はあらゆる方向へ拡がる球面波ではなく、「輻射線の発射の要素的過程は方向をもち gerichtet」、「その発射・吸収は一定のエネルギーの量子においてのみおこなわれる。この光量子仮説によってのみ上述の問題は解決されるであろう」[21]。かようにきわめて影響するところ大きい予言的主張をおこなったのである[22]。

かくてホイゲンス－マクスウェル－ローレンツの光の波動説に対するニュートン－アインシュタインの粒子説という二大学説の、物理学いな全科学[23]にかつてその例を見ない、歴史的対立が復活することになった。

アインシュタインはすでに一九〇五年の論文で、空洞輻射のエネルギーの空間的分布の揺動 Schwankung を論じ、輻射密度の小さい（ヴィーンの式が成り立つ）範囲では、その揺動が理想気体または稀釈溶液の分子の空間分布の揺動とまったく同形になることを示し、輻射はそのような場合には、相互に独立な多数のエネルギーの粒子の集まりと見られると述べた[24]。

さらに一九〇九年には、空洞輻射の時間的な揺動を論じ、プランクの式を基として、それが、ヴィーンの分布式に相当する輻射を粒子と見なした場合の項とレイリー－ジーンズの式に相当する古典的な波動と見た項の和として得られることを証明し、この式はのちの波動場の量子論から得られ

る結果と一致するものであって、すでに当時において、輻射の二元的性質を明らかにした。[25]

すでにこのころには量子論はようやく学界の注目をひき、従来の統計力学、就中そのエネルギー等配分律の適用が経験と矛盾する諸問題へ〔量子論が〕適用されることになった。すなわち固体比熱の問題はアインシュタイン自身によって先鞭をつけられ、[26] P・デバイ、[27] M・ボルン、Th・v・カルマン[28]が継続し、多原子分子の回転の問題にはネルンスト[29]が手を初めたが、これらの研究[30]の結果は明らかに旧理論の矛盾に対し、量子論の勝利を寿ぐものであった。ただ金属内電子論では成功しなかったが、[31]これはフェルミ統計が知られていなかったためである。別にJ・シュタルクは早く、カナール線の kinetic radiation〔運動による輻射〕の説明や、光化学反応へも量子論を応用した[32]が、一九一四年以後[33]は量子論を棄て去り、独特のイオン説を唱え、長く新理論の排撃者となった。

これらの理論的研究がいずれもほとんどドイツの学者（低温問題で少数のオランダの学者）によっておこなわれたことは注意すべきで、量子論はいまだ国際的承認には達しなかったのである。

かように量子論は一歩一歩地歩を固めていったが、それにもかかわらず光量子仮説のような革命的な学説が幾多の難問に逢着したことは想像にかたくない。従来、光の波動説が粒子説に対してその優先を証明した幾多の問題、干渉、廻折(ママ)、屈折、分散のような現象を説明することは、光量子仮説に課せられた当然の使命であったが、少なくとも当初は、統計的に解すべきものであろうというほかはまったく具体的な手懸りをつかみえなかったのである。非常に弱くて、個々の光量子が相互に交渉できないような微かな光でも、依然として干渉が起こる（G・I・テイラー）という事実は、

単なる粒子としての光量子からは、たとえ統計を援用しても不可解に見える。干渉を二個以上の光量子の相互作用に帰することはエネルギー保存則にも背反するであろう。[34] そもそも光量子$h\nu$のνにしてからが、波動論を離れてはついに物理的意義を失った一個の係数以上のものではない。

それぱかりではない。もしも輻射に粒子的構造を仮定するならば、ローレンツが指摘したように幾多の奇怪な矛盾さえ生ずる。

もし、輻射線の吸収が量子的におこなわれるとすれば、あるエネルギー量子の整数が吸収されるか、または全然吸収されないかであって、その中間は許されないはずである (Alles oder nichts!)。しかしある瞬間から物質に投射されはじめた輻射が一定の量子に達しないうちに終わることも可能と考えなければならない。しかし物質はどうして、あらかじめ輻射がいつまでつづくかを知りえよう。しかしこれを知らずには吸収はできないことになる。プランクは具体的な例について、一つの量子に相当する吸収が $\tau=4200$ 秒という長時間を要する場合を示している。そこでプランクは、この奇怪な矛盾を避けるために輻射論を修正し、エネルギーは発射の場合にのみ量子的・不連続的で、吸収は連続的に任意量おこなわれると仮定した。[35] かくすればマクスウェルの理論は真空中でも成り立ちうることになるから、プランクが輻射式の導来の際、古典理論と量子をともに利用したことの矛盾はある程度まで解消するので、この立場から書かれた彼の熱輻射論は重要な進歩をしたものと見なす人もあった。[36] プランクが一九二三年の熱輻射論第五版でもなおマクスウェルの理論の立場からの解決に希望を継いでいるのを見ても、[37] 問題の深刻さが了解されよう。

光量子そのものの形状については、さらに驚くべき矛盾が暴露された。人は漠然と光量子を狭い

空間に限られた球状もしくは針状等の小粒子として想像するかもしれない。ところが次の事実を見よ。光の干渉は kohärent な〔コヒーレントな、干渉可能な〕波についてだけ考えられるが、別々の量子は kohärent でないと考えられる。いまルムマーーゲールケの実験(一九〇三)から知れているように、干渉可能な光波が二〇〇万個以上も連続するという事実は一つの量子が一メートル以上もの長さをもつと見なす必要を生じる。つぎに、望遠鏡の対物レンズの両端を通った光が干渉できるという事実を考えると、一つの光量子が少なくも対物レンズ程度の大きさをもつと見なければならない。しかし、こんな大きな光量子がどうしてわれわれの眼の瞳孔にはいれるであろうか! まことに absurd〔不条理〕な結果である。[38]

それにもかかわらず、Credo quia absurdum〔不条理なるがゆえに信ず〕で、[1] プランクの折衷論に満足せずラジカルなアインシュタインの説に賛成する学者もあらわれてきた。

しかし、何と言っても基礎概念に潜む幾多の謎は、一般を承服しえず、たとえば、いかにして古典理論を棄て去ることなく熱輻射の正しい法則を導くべきかの問題には、当時の一流の学者も長いこと努力をつづけたのである。すでにローレンツ(一九〇三)、J・H・ジーンズ(一九〇五)その他種々の方向からの研究の結果はいずれも古典理論、就中、エネルギー等配分律がレイリーの公式へ導くことをますます確かめるに過ぎなかった。理論と実験結果との食い違いを、実験が厳密に平衡でない系を取り扱っているためではないかという疑いで避けようとしたジーンズの苦しい逃げ路(一九〇九)も、ますます精確にされていた実験の結果に背き、望み少ないものであった。エーテルを保存しようとするレイリーやローレンツのような偉大な学者の苦心も、熱輻射の実験的事実の前

には空しき骨折りに終わった。
まことに理論物理学の危機であった。
こうした状勢のもとに一九一一年の秋ベルギーのブリュッセルで開催された第一回のソルヴェイ会議[39] Conseil Solvay は、量子論を国際的にした記念すべき会議であった。[40]
会議は、その後もそうであったようにH・A・ローレンツを議長としてすすめられたが、招待を受けたレイリー卿が一書を寄せて、自分はなんら新しい解釈を見出したわけではないが、「力学的法則は物体の極微部分には適用されないとする解決策には sympatisch たりえない〔共鳴しえない〕。……エネルギー量子の仮説を実在の正しい像と見なすことは自分には困難である」といい、招待を辞したのは、まず古典論の一歩退却であった。最初に起ったローレンツは、古典力学のハミルトンの方程式から出発すればレイリー以外の輻射式に達す可能性はないと断言し、将来のすべての物理学の理論が古典力学の法則にしたがわねばならぬことはないが、マクスウェルの理論を変更することは困難ではないかと見ている。ジーンズも、なおハミルトンの方程式によりながらも輻射の機構に或る仮定をして、経験と正しく合致する輻射式に望みを継いだ。しかし、実験物理学の報告はことごとく決定的に量子論に有利であって、古典理論はあらゆる努力にもかかわらず救いがたく窮地に追い込まれるばかりであった。
プランクは、既述のローレンツのパラドックス等も考慮して、量子説は採用せず、真空中では輻射はマクスウェルの式にしたがうとしたが、一般化された座標qとそれに応ずる運動量pが、確率の要素的領域で

という基本作用量子の仮説で相互に結びつけられていることを、根本的なものとして提唱した。

プラーハから出て来たアインシュタインは比熱問題を論じた。まことにポアンカレが言ったように「この会議で論じられた新しい研究は力学の根本原理を疑わしくしたばかりではない。従来、自然法則一般の概念とまったく混用されてきた一点をも動揺させる。すなわち、われわれはなおその法則を微分方程式の形で表わしうるか否かが問題である」。他方ポアンカレがプランクの古典論と量子説との折衷を矛盾として批評したことはすでにまえにも触れたとおりである。[41]

ネルンストの提案に基づいてポアンカレは、質量が速度とともに変わることで、あるいは古典理論を救えるかも知れぬという、はかない期待をもってパリへ帰って計算したが、「不連続なエネルギーの概念を用いずには正しい輻射式は得られぬ (L'hypothèse des quanta est la seule qui conduisse à la loi de Planck)」という結論に達した。

もちろん、実験的に見出された法則は近似式以上のものではないから、プランクの法則と測定誤差の範囲内で一致し、しかも連続説に立つ他の法則が可能ではあるまいかとの疑問も起こるであろう。しかしこれに対してもまた、ポアンカレの研究の結果は決定的なノン！であった。

このポアンカレの結果は、いたく理論家を動かし、従来反対をつづけていたジーンズも自分の努力の空しかったことを認めるに至った。ボーアの原子論が発表された直後、一九一三年九月、バーミンガムで開催されたブリティッシュ・アソシエーション[42]では、president〔座長〕としてオリヴァ

ー・ロッジ卿が "Continuity〔連続性〕" と題する長大な演説を試みて古典論を擁護したが、量子論の基礎は分子が或る最小限の刺戟に達するまでは振動をはじめないことにあるとした。輻射に関する討論会では、ジーンズは熱心な量子論への改宗者として登場し、ポアンカレの結果を強調して全面的に量子論を擁護せねばならぬとした。光の波動論とはいかに和協するかについては「エーテルを全然廃棄し、相対性理論のそれのような、ある純粋に記述的な原理に頼ることであろう。宇宙の究極的解釈が運動学的記述的でなくて力学的であると期待すべき十分な理由はおそらくないであろう」と、興味深い予言をした。

ローレンツがジーンズにだいたい賛成するといいながらも物質とエーテルの環 link になるものとして「ある種の vibrator〔振動子〕」を用いようとしたことや、J・ラーマー、A・E・H・ラヴが古典論を救おうとしているのは、いかにエーテルが深く理論家をとらえていたかを知るに足るのである。

いずれにせよ、ジーンズものちに述べたように、「物質と温度平衡にある単位体積内の全輻射エネルギーが有限であって無限でないこと」はニュートン力学を crucial test〔決定的試練〕にかけたものであり、問題は程度の差ではなく、有限か無限かの区別であって、その有限性は「なんらかの方法で究極的運動の不連続性を要求する」[43]。そこでプランクの要素領域 $\iint dp\, dq = h$ が、「一般化された空間内の系はたがいに他のものと区別できず、それは単一の状態を形成する」ことを意味するから「一つの物理的系は有限個の画然とした状態をとりうるのみであり、それはこれらの状態の一つから他の状態へ飛躍し、中間状態の連続的系列を経過しない Un système physique n'est

susceptible que d'un nombre fini d'états distincts ; il saute d'un de ces états à l'autre sans passer par une série continue d'états intermédiaires」というポアンカレの結論が出てくる。(4) ボーアへの道は坦（たいら）かにされた。

（1） 一方にプランクの輻射式がプランク常数 *h*、ボルツマン常数 *k*、光速度 c を含む大法則となることを讃えるもの（シュタルク）があれば、他方にはこの式が基礎的なものとしては複雑に過ぎる〔とする〕もの（ラザフォード）があったとは、長岡半太郎博士の回顧されたところである。

（2） プランクの分布式が実験結果を最もよく再現するという点は認められていた。彼自身としては、*h* が普遍常数であることには重きをおいていたが、また古典物理学との根本的対立がそれから生まれるとは予想していなかったらしく、それは一九〇八年の *Die Einheit des physikalischen Weltbildes* や一九一〇年の *Die Stellung der neueren Physik zu mechanischen Naturanschauung* にもほとんど取り上げられていない。

ポアンカレの科学の基礎を論じた諸著にはまったく無視され、ずっとのちに一九一一年のソルヴェイ会議後に書かれた遺著 *Dernières Pensées* に初めて現われている。

実験物理学者A・シュスターがカルカッタ大学の講演（一九〇八年）で量子論にまで言及したのはかなり異例であり、この興味津々たる講演をますます価値づけている。*The Progress of Physics*, Cambridge (1911) とくに一一一ページ参照。P・レーナルトはこの講演を表面的なりとして非難しているが、公平な評とは思われない。

（3） *Berl. Ber.* 9, Jun. 1887, *Wied. Ann.* 31, S. 983, *Gesammelte Werke* Bd. Ⅱ, S. 69

（4） *Wien Akad.* 108, 1649 (1899)

（5） *Wied. Ann.* 45, S. 28 (1892) *Gesammelte Werke.* Bd. 1, S. 355

（6） Sommerfeld, *Atombau u. Spektrallinien* §2 (1924) 参照。

（7） Über die lichtelektrische Wirkung, *Ann. d. Phys.* 8. S. 149 (1902)

（8） 他方、J・J・トムソンは一九〇三年イェール大学での有名な講演で、X線による気体分子の ion 化がきわめて少数の分子においておこなわれるという事実を指摘し、これは wave front が一様な球面波と考えては、解決できないから、すでにファラデイにも萌芽の見える discrete な fibrous な構造をもつ力線によって置き換えれば説明

できるであろうとした (*Electricity and Matter*, p. 62)。

(9) 桑木彧雄博士　アインシュタイン伝 (改造社) 参照。

(10) Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichfspunkt. *Ann. d. Phys.* 17, S. 132 (1905)

(11) Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Ann. d. Phys.* 17 (1905)

(12) Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Ann. d. Phys.* 17, S. 549 (1905)

(13) じつは例外的にのみ正しい。

(14) もちろんアインシュタインはこの式をジーンズとは独立に無名のままで導いている。

(15) $\Pi\varepsilon=\frac{R}{N}\beta\nu-P$

(16) *Ann. d. Phys.* 20, S. 199 (1906) ここで Licktquanten の語が初めてあらわれる。最初の論文では、Energiequanten, Lichtquantenenergiequanten と呼ばれている。

(17) Planck, *Wärmestrahlung* 第1版、§148-9, S. 152-154 (1906)

(18) しかし当時は新しい学説が学界にその価値を認められるのには今日よりはるかに多くの困難と戦い、長い時間の忍耐を要した。アインシュタインの一九〇五年の大きな業績も、けっして発表と同時に学界を驚嘆させるというようなものではなかった。

(19) *Bulltin de l'Académie des Sciences de Cracovie*, P. 577 (1906)

(20) *Comptes Rendus* 146, p. 967, 147, p. 475, 530, S. 594 (1908)

(21) プランクがこの講演を謝して後、空間中を粒子として伝播するということには、にわかに賛成できないと述べたのは彼の態度を示すものである。

(22) Einstein, *Phys. Zeitsch.* 10, S. 185, S. 817 (1909)

(23) おそらくは天文学におけるプトレマイオスとコペルニクスの天動―地動二大体系の対立は例外として。

(24) 理想気体の体積 v_0 中にすべての分子 n 個が偶然のチャンスによってはいってしまう確率は $(v/v_0)^n$ であるが、輻射についてもボルツマンのエントロピーと確率との関係をヴィーンの分布式に適用すると v_0 中の全体のエネルギーが中にはいる確率として上の n に相当するところに全体のエネルギーをエネルギー量子の値で除した数をおきかえた形

が得られる。

(25) *Phys. Zeitschr.* Bd. 10, S. 185 (1909)

ν 中にあるエネルギーをEとして、時間平均値を$\bar{E}$とすれば、ν と $\nu+\Delta\nu$ のあいだの振動数の単色輻射線エネルギーの時間的揺動の平均として

$$\overline{(E-\bar{E})^2}=\underbrace{h\nu\bar{E}}_{\text{粒子的}}+\overbrace{\underbrace{\frac{c^3}{8\pi\nu^2\Delta\nu}\cdot\frac{\bar{E}^2}{V}}_{\text{波動的}}}^{\text{粒子－波動二元的}}$$

ヴィーン式　レイリー－ジーンズ式

(26) Einstein, *Ann. d. Phys.* 22, S. 180, 800 (1907)

(27) Debye, *Ann. d. Phys.* 39, S. 789 (1912)

(28) Born-Kármán, *Phys. Zeitschr.* 14, S. 15 (1913)

(29) Nernst, *Berl. Ber.* S. 65 (1911)

(30) 気体単原子分子の degeneration に関しては O. Sackur, *Ann. d. Phys.* 36, S. 958 (1911), いわゆる chemical constant について、O. Stern, H. Tetrode (1913—) 等がある。

(31) F・A・リンデマン、W・ヴィーンの努力は空しかった。

(32) J. Stark, *Phys. Zeitschr* 8, S. 913 (1907), 9, S. 767 (1908), *Ber. d. Deutsch. Phys. Ges.* 10, S. 713 (1908), *Phys. Zeitschr*, 11, S. 25 (1910)

(33) J. Stark, *Verhandl. d. Deutsch. Phys. Ges.* 16, S. 304 (1914), 18, S. 42 (1916) 等。

(34) cf. Dirac, *Quantum Mechanics*, 2nd ed. §3 すなわち当時は確率がある場所にある光量子の蓋然的個数ではなくて、1つの光量子の存否の確率であることが、明瞭に了解されていなかったのである。

(35) *Verh. d. D. phys. Ges.* 13, S. 138 (1911); *Berl. Ber.* S. 723 (1911)

(36) S. Valentiner, *Die Grundlagen der Quantentheorie*, 3te, Aufl. Sammlung Vieweg S. 16 (1920)

(37) *Wärmestrahlung*, 5te Aufl. S. 192 (1923)

(38) H. A. Lorentz, *Phys. Zeitschr.* 11, S. 349 (1910) このローレンツの提出したパラドックスは量子論の輝かしい成功によって忘れられてしまったが、じつはボーア－ハイゼンベルクの見方によってのみ解かるべき謎であった。

(39) ソルヴェイ会議というのはベルギーの応用化学者でソーダ製造のソルヴェイ法の発明で名高いソルヴェイがネルンストのすすめなどもあって、物理学の尖端的な諸問題をその問題に関する世界一流の学者のみを招待して非公開で講演・討議せしめ、斯学の発展に寄与せしめようとした企てで開かれたものであって、このときを最初として大戦の際を除きだいたい三年に一回の割合で開かれる新物理学の最も注目されている行事の一つであり、一九三九年には初めてわが国からもメソン理論の創唱者たる湯川秀樹教授が招待されたのであるが、惜しいかな第二次大戦勃発のため中止となった。

(40) *Die Theorie der Strahlung der Quanten, Verhandlungen der Konseil Solvay* [30. Oktober bis 3. November 1911], herg. von. A. Eucken (Halle) 1914 による。

(41) 当時の状況からすると、プランクの理論のうちには光の波動論と粒子論とが並存していたのであるから、矛盾は当然のことで、この矛盾的対立は、現象そのものに客観性をもっていた。この矛盾はのちのボーアの相補性の概念、数学的には波動場の量子論で初めて合理的に止揚された。

(42) *Report of Britisch Association*, Birmingham (1913), p.376 以下。ロッジのは巻頭にある。

(43) Jeans, Report on the quantum theory of radiation, pp.1~2, 29 これはアインシュタインの一九〇五年の最後の論文でも指摘されたことである。

(44) H. Poincaré, *Dernières Pensées*, p.185 (1913) 晩年の思想（岩波文庫）一七四ページ。

〔1〕 選集版では「Credo quia absurdum. (それにも拘らず)」。

§6　実験の技術とボーア以前の原子物理学

"The history of scientific discovery is to a great extent the history of scientific instrument and appliances"[1]

——A. Schuster, *The progress of physics*, p. 52.

われわれの叙述は量子論の発展の論理的分析を主眼としているので、前世紀末以来、実験物理学が物質の究極的構造についてもたらした多数の偉大な発見をいちいち詳細に数え上げることはいきおい差し控えなければならない。

しかし、今日の量子物理学を、その発展してゆく生命力の深みから根本的に把握しようとするならば、理論を基礎づけ検証する実験的技術や、ことに実験の手段を無視することは許されない。これは、たとえまったく抽象化された形においてであるにせよ、観測の理論が量子力学の基礎に深く食い入って、理論と実験との相互関係が、いまだかつてないまでに注目されているおりから、とくに肝要なこととなった。

そこで、より適当な分析は後章の適当な個所に譲るとしても、きわめて簡略で表面的にではあるが、原子的現象に関連した諸発見に関しても二、三の挿話を述べることにする。

現代の原子物理学の実験室を初めて訪れるものは威嚇的な高電圧装置に目を見張るとともに、硝(ガラ)

子細工の真空装置やそのポンプの鈍い響きにも気がつくことであろう。高電圧装置についてはずっとあとに述べることにする。真空技術や真空管は、物質の構造に関する実験的探究には、まことにその出発点から重要なる役割を演じてきたと言えよう。[1]

すでにガリレイは落体の法則を導くにあたって、それを空気の抵抗を除外した理想的条件のもとで実現される法則であるとして証明しなければならなかった。彼の対話篇ではガリレイの代弁者サルヴィアッティはこの問題を論敵たるスコラ学者シムプリキウスに納得させるために幾度か多くの言葉を尽している。

かように、古典力学でも真空中の現象は、一般的に言って、擾乱を取り除いてできうるかぎり簡単な、いわば純粋な条件のもとで現象の経過を見、法則を見出そうという自然科学の基本的な理想化の手段であった。しかし古典力学が扱った粗視的な物体の運動は、存在する気体によって比較的わずかに修正されるだけであったから、思考実験によって、ないしはたかだか気体の密度を減少させることによって、現象の経過の理想化される方向を見定めて、単に思考のうえで〔の〕連続的な極限移行によって、抵抗の皆無の場合に達すればよいのであった。したがって古典物理学は真空に特殊の興味をいだかなかった。[2]

原子的現象における真空の意義はこれとは比較にならないほど大きい。ここでは現象は、存在する気体によって歪められるばかりでなく、複雑化され、平均化され、あるいは生起しなくなり、その輪廓すら捕捉しがたく、日常茶飯の経験のうちに埋没されてしまうことが大部分である。真空度が現実的に高められ、あるいは限度に達すると、思考実験で理想化するにはあまりにも異質的な、

予期されない現象が突如としてあらわれる。あるいは、残留気体のために惹起された種々の擾乱的な副次的現象が研究者を欺き、謬(あやま)った結論へと導いていく。レーナルトが純粋研究 reine Versuche を強調したのは、主として不完全な真空が不純な条件を構成した例についてである。[3] まことに「純粋な科学的発見と技術の進歩の交互作用に〔ついて〕は高温真空管の発見史にまさる好例はあるまい」。[2]デーヴィが真空放電の際に硝子(ガラス)壁が緑色に蛍光するのを認め（一八二一）、その弟子ファラデイが今日彼の名で呼ばれている陰極と陽極暈光とのあいだの暗い部分に注目した（一八三八）のは、すでに十九世紀前半のことであった。

各種の科学器械の製作に優れ、硝子細工の名人であったH・ガイスラー（一八一五〔四?〕—七九）が、彼の真空ポンプで有名な真空管を作った（一八五四）のは、ボンの大学で以前には解析幾何学者として令名あり、当時はすでに実験物理に転向していたユリウス・プリュッカー（一八〇一—一八六八）に見出され、その指導によるものといわれる。

プリュッカーという人は手先が器用ではなかったが、実験に必要なものをよく見通して、他人にそれを実行させることに優れた能力をもっていた、と彼の優秀な弟子ヒットルフは伝えている。たとえば、彼の磁気的研究に大いに役立った大電磁石はセイナー社 Sayner Hütte から手に入れ、器械は彼の以前の学生であった技術者フェッセルに作らせ、彼のスペクトル研究はガイスラーのポンプと放電管製作によって可能となったものである。

プリュッカーは、すでにキルヒホフーブンゼンに先立ち、スペクトル線はそれを発する元素に特有のもので化学分析に役立つと述べたし、水素のスペクトラムの三つの線を最初に発見したのも彼

であったといわれる。

真空放電の際、螢光が磁石によって場所を転じることを発見し、陰極からある線が発射されることを最初に認めたのは、このプリュッカーであった[4]（一八五八）。

しかし、「陰極線」研究が本格的になったのは弟子のJ・W・ヒットルフ J. W. Hittorf（一八二四―一九一四）からで、彼は、この線が陰極からほぼ垂直に発せられ直進すること、磁力による屈曲や、障害物によって吸収されることなどを発見したが、彼の発表は総合された形でなかったため、あまり世に認められなかった[5]。彼は「陰極線には静電的・動電的性質がまったくないか、あってもごくわずかである」という誤った結論も出したが、これは彼が高度の真空を得られなかったためである。ヒットルフはよい実験装置が得られず、多大の努力をその配慮に費したといわれる。

これに対してウィリアム・クルックス William Crooks（一八三二―一九一九）は「より幸福なる国の子」であった。彼は輻射圧を実証するラジオメーター radiometer の考案と関連して、受光器中の残留気体に苦しめられ、従来まったく空気の痕跡がないと信じられていたいわゆる「chemical vacua」もきわめて不完全な真空にすぎないことを認識したが、これはその後の実験に決定的であった。すなわち彼はシュプレンゲルのポンプに著しい改良を加え（一八六五）、ついに Lichtmühle[3]（一八七六）に成功したが、この真空管が動機となって陰極線の研究にすすみ、一八七四年シェフィールドでの講演「輻射する物質あるいは第四状態」（一八七九年出版[6]）では各種のきわめて生彩ある実験で陰極線の性質を示し、その本質は粒子的であるとして、ここにこそ「全世界の物理的基礎をなす細微不可分の粒子、根本原子がある」「まさしくわれわれは物質と力とが相互に移行するかに

見える限界、既知と未知とのあいだの影の国に触れ」「未来の最大の科学的問題はこの限界にその解決を見出し、そればかりか、ここにこそ究極の実在が存する」という調子の高いものであったから、これ以来、陰極線は広く一般にも知れわたった。[7]

もっとも粒子性を認めたのはヴァーレイ（一八七一）が最初といわれ、[4]「陰極線 Kathodenstrahlen」の名はゴールトシュタイン（一八七六）から出た。彼は電場による屈曲を発見している。

マクスウェルの烱眼はすでに七〇年代の初めに、この真空放電をきわめて必〔重？〕要なものと認め、「これがよく理解されるならば、電気の性質や気体や空間に瀰漫する媒質の性質に偉大な光明を投ずるであろう」と言い、学者の研究を称揚[8]〔奨揚？　慫慂？〕したが、一方では電気分解に関連して「molecule of electricity〔電気の分子〕を仮定すれば、たとえそれが彼の研究の他の部分調和とを欠くにせよ、当面の困難に打ち克つことができる」と述べて電子論に先鞭をつけた。[9]

この後ジョンストン・ストーニー はベルファストのブリティッシュ・アソシエーションで "On the physical units of nature"〔自然界の物理的単位について〕という論文を朗読したが、「electron」という言葉はここで初めて用いられたのである。しかしこれは今日のエレクトロンという物質粒子の意味ではなく、電荷の究極的単位を意味するものであって、この用語法は二十世紀の初めにも、J・J・トムソン、ラザフォードらに用いられている。ストーニーはC・G・S単位にかわるものとして、この単位電荷、万有引力常数、光速度からなる自然単位を提唱している。[10]この論文が公刊されたのはずっとのちの一八八一年であったが、この年にはヘルムホルツがロイヤル・インスティテューションでおこなった有名な Faraday Lecture〔ファラデイ講演〕で、「化学的原素の原子を

仮定するならば、電気にもまた電気の atoms のような態様を示す正負の一定の基本量 in bestimmte elementare Quanten に分割される」と述べた[11]のである。

ヘルツが彼の仕上げした古典理論を自ら打破する結果となった最後の実験、陰極線の金属薄片透過については、まえにも触れた[12]。しかしヘルツは、金属薄片を通過した陰極線が拡散されることや、とくに、放電管内に設けた蓄電器の電場で屈曲されなかったことから、陰極線の本質をエーテル内の現象と考えた[13]。電気的粒子ならば静電場で屈曲されなければならないはずであったが、この場合にも真空が十分高度でなかったので、陰極線が残留気体を電離して導体にしてしまったためであることは、のちに判明した。

ヘルツの電場も十分強くはなく、この当時の高圧電源にはみな苦心したものである。すなわち、当時は高電圧を得るには induction〔感応、誘導〕によるか、テプラーの起電機か、ないしは最も安定した蓄電池によるかであって、今日から見ると隔世の観〔感?〕がある。

レーナルトは以前から陰極線の研究をしていたが、やはりポンプには苦しみ、アーヘンに彼がポンプを残して転任したあとへ Reichsanstalt〔国立研究所〕からW・ヴィーンが来て、偶然にもレーナルトと同じ題目の研究に大いに役立てたものといわれている。一時レーナルトはボン大学でヘルツの助手となっていたが、陰極線を放電管の外に取り出して研究しようとし、ヘルツが得た製本用の金属箔はあまり薄すぎるので、その生産の中間行程にはちょうど適当な厚さのものがあろうと考え、わざわざニュルンベルクへ旅して裏街を探してようやくそれを見つけたという。この金属片の窓からついに陰極線を取り出し、それがいわゆる Lenard ray〔レーナルト線〕と呼ばれ、依然と

して荷電を有するところからその本質を分子のイオンとは考ええないという年来の宿題を解決した。[14]

J・J・トムソンもやはり陰極線を静電場で屈曲させようとしたが、初めはできなかった。ところが彼が真空を十分に高めたところ、急に蓄電器を（ママ）充電して、屈曲が見られ、徐々に元へもどった。彼はこれを、陰極線が気体を電離するものと説明し、ヘルツの不成功もこれで明らかになった。トムソンは磁場および静電場による屈曲を結合した方法で荷電と質量の比 e/m の測定に成功し、彼自身や他のキャヴェンディシュ研究所の人々の手で測定された荷電の値と併せて、ここに初めて電子の存在が確証された。[15] ヴィーン、レーナルトもほぼ同じころ、静電場による屈曲に成功した。

このように陰極線の研究は、実験の技術・装置に併行して発展し、その歴史はきわめて教訓的である。[16]

高度真空の要求は、陽極から出る陽イオンの線、ゴールトシュタインが陰極に孔すなわち Kanal〔通路〕を作って、これを通過させて発見したカナル線の場合にも（一八八六）もちろん同様である。これが陽電気を有することはW・ヴィーンが実験で証明した（一八九七）。ついでJ・J・トムソンやその他キャヴェンディシュ研究所の人たち、就中（なかんずく）アストンらがこの陽電気を帯びたイオンの質量を測定して、元素の質量分析にすすみ、原子構造論、同位原素の問題に大飛躍したのは人も知るところであろう。

これよりさき、オランダの物理学者H・A・ローレンツ H. A. Lorentz（一八五三―一九二八）は、彼の有名な電子論の研究[17]（一八九五）のなかで展開した理論に基づき、翌年ゼーマンが発見した磁場によるスペクトル線の分裂、いわゆるゼーマン効果を説明することができた。ところが上述J・

J・トムソンの研究でも、このローレンツの場合でも、今日の意味における電子は「ion」と呼ばれていて、それが Elektron といわれたのは、同じく電子論を光学的現象や金属の問題に適用したドルーデによってである。[18]

ローレンツによるゼーマン効果の説明は、[5] ゼーマンが偶然にも最初に認めたいわゆる「正常ゼーマン効果」の場合にだけ有効で、つづいて発見され、〔しかし〕説明ができなかった「異常ゼーマン効果」とは違い波数の移動 $\varDelta\nu$ の式に、量子論の効果が潜在的で作用量子 h が出てこないために、まったく偶然的に説明できたことはのちに判明した。

ヘルツ－レーナルトの陰極線の実験を繰り返そうとしたW・C・レントゲン W. C. Röntgen（一八四五－一九二三）は一八九五年の末、放電管の近くに放置された写真フィルムの曇りにヒントを得て新しい放射線を発見した。この発見は、彼がきわめて高度に排気した管を用いていたこと、肉眼で見られない、透過力の強い線は、もはや学者には想像されえたことから見て、単に「偶然」とはいわれない。レントゲンが、曇ったフィルムを悪い品と見なかったのには、こうした理由があったのである。ここでわれわれはすでに分光学等に利用されていた写真の科学的役割がいちだんと光彩を添えたことも見逃せない。X線という名は、この放射線が当時の学界に捲き起こした好奇の感情とその謎めいた本性をよく表現している。学界ばかりでなく、X線とラジウムは世紀の転回期において通俗科学の寵児でもあった。[19] しかし、このX線が発見された当時には、この実験に必要なよい真空を得る設備をもつ研究所はいくらもなかったといわれ、この研究のパイオニアはテプラーとかシュプレンゲルのポンプを用いたと聞くだけで、その不便が偲ばれるのである。しかし、このX線

が間もなく医学に、しばらくのちに工学に応用され、熱陰極管たるクーリッジ管が広く用いられるに及んで、これは最高度の真空を要求し、ますます真空技術の発展を促進することになった。上述のJ・J・トムソンの電子の発見、光量子説の動機となった光電効果、あるいはまた同位元素の分離、電離のエネルギーの決定等々にも高度真空が要求され、この研究が、タングステン電球や、無線電信、電話の発信・受信管、X線管、整流管等の工業的生産を背景としてゲーデ（ドイツ、一八七八—x〔一九四五〕)、ラングミュア（一八八一—x〔一九五七〕)、ダッシュマン（ともにアメリカのゼネラル・エレクトリック・カンパニーが有する一流の学者である)、クヌーセン（オランダ〔デンマーク〕)、デュワー、N・R・キャンベル（イギリス、彼もまた異色ある科学論で知られている）らの努力によって長足の進歩をとげたのでる。

かようにして、都市照明用の炭素線電球や、軍事上きわめて重要な無線電信用の発信管の製作によって工業的に拍車をかけられた真空技術の進歩が、真空放電やX線研究、電子の存在、陽極線分析、同位元素の探究等に大きな意義をもったことは周知の事実である。X線用のクーリッジ管のごときは、はなはだ高度の真空を得る技術の完成をまって初めて製作されるに至った。まことに工業的発展と純粋科学の発見の緊密なる作用を示すに真空技術のごときは最もよき例と言えるであろう。

しかるに発見の偶然はなおつづいた。

陰極線研究から「偶然」にもX線が発見されたように、X線はまたも大発見の機縁となった。われわれはここでもまた「写真」が重要な発見者の役を演じていることを見る。アンリ・ベクレル Henri Becquerel（一八五二—一九〇八）は親譲りの研究として fluorescence〔螢光〕や phosphor-

escenec〔燐光〕の現象に通暁し、多数の螢光を発する物質を所有していたが、H・ポアンカレがX線の励起をこの種の現象に帰しうるのではあるまいかと暗示したのにしたがい、それを実験的に験証しようと試みたが、成功しなかった。ところがこの際ウラニウム塩類が黒い紙で被覆した写真乾板へ作用することを発見し、最初は日光がウラニウムを励起したもので、まさしく彼の予想どおりだと考えたが、日光とは関係がないことが判明し、ついに予想しなかった「radioactive」な物質がウラニウムのすべての化合物に存在することを発見したのである。これからキュリー夫妻のラジウム発見、ラザフォード－ソディの原子崩壊説が発展したことはあまりにも有名である。こうして、かのメンデレーエフ Mendelejeff（一八三四－一九〇七）、L・マイヤー L. Meyer（一八三〇－一八九五）の元素の周期律表に見られる原子群の構成の秘密はここに解決の端緒を得、それとともに原子そのものの構造にも研究の緒口が得られることになった。

ところが、原子の不変性という機械的な観点、atom〔分割できないもの〕の字義に捉われた旧式な学者は、原子崩壊説に直面してかなり思想的に混乱を生じ、それが種々雑多の誇張や歪曲をともなって、前世紀後半以来通俗化されていた唯物論の「克服」に利用されたりして、はなはだしきは心霊主義まで持ち出されるにいたったのは、二十世紀初頭の注目すべき事実であった。

しかも一方には、アインシュタイン、M・スモルコフスキのブラウン運動の理論がJ・ペラン、Th・スヴェドベリによって実験的に証明され、分子原子の実存が疑いがたくなり、さらにのちのX線による結晶体のラウエ斑点等から、もはや物質の原子的構造は問題でなく、原子そのものの構造の理論が熱心に研究されることになってきた。

(1) G. W. C. Kaye の名著 *High Vacua* (1927); S. Dushman, *Die Grundlagen der Hochvakuumtechnik* (1922), F. H. Newman, *The production and measurement of low pressures* (1925) はいずれも真空技術の原子物理学への寄与を説いている。

(2) S.Dushman 前掲書。

(3) レーナルトは彼のノーベル講演に説明をつけた *Über die Kathodenstrahlen* の第二版で、この点を強調し、多数の研究者の実験に、この「純粋性」の欠けていたことを指摘した。

(4) *Pogg. Ann.* 105, S. 70 (1858); 107, S. 110 (1859) その他。

(5) Über die Elektrizitätsleitung der Gase, *Pogg. Ann.* 136, S. 1; 197 (1869) レーナルトは前述のノーベル講演の第二版に「ヒットルフ」と題する付録を加え〔て〕[6]彼の功績を讃え、歴史を正すと称している。しかし、あまりにも国粋主義的な書き方と彼の限〔視?〕界の狭さは、独特の偏見で見るところが多く、文献の渉猟も不完全である。ヒットルフの研究は二〇年にもわたっている。

(6) 彼はこの Strahlen を物質の第四の Aggregatzustand と見、ここにおいて物質と力とが相互に fliessen する Grenzland に達したと考えた。

(7) *Phil. Trans.* p.135, pp.587, 661 (1879) 単行本としても版を重ねた。これの講演の理論的 Speculation は精神的でほとんど魔力を有するかのごとく、当時の若いジェネレーションに働きかけ、レーナルトもこれから彼の研究を定めたと告白し、Tesla は学生時代一度読んだだけで、そのいちいちを少しも忘れられなかったという。しかし、科学的にはヒットルフの研究を(もちろん知らずに)繰り返したものが多かったのである。クルックスの研究にはマクスウェルも助言したといわれ、ストークスとの往復書簡 (*Scientific correspondence of Sir George Stokes*) も重要文献だそうである。

(8) J. C. Maxwell, *A Treatise on electricity and magnetism* (1873) 現在の版では六〇—六一ページ。

(9) ibid. p.380 もっとも彼はすぐ一ページほど後で、この考えは extremely improbable で、将来さらに確実なことがわかるであろうとして、当時の学問の動揺を示している。

(10) *Proc. Dublin. Phil. Soc.*, iv

(11) *Vorträge und Reden*, Bd. II, S. 272

(12) ヘルツが彼によって完成せしめられたマクスウェルの論理を超え、力線の伝播から力線の源泉の問題へ眼を転じ、

陰極線研究の実り豊かな未来性を認め、陰極線の金属薄片透過を検べようとしたのは、彼の最後の実験であった（一八九二）。彼が遺したこの研究は、やがて彼がその最後の仕上げに力を尽した古典物理学の世界像を無力にし、次の世代を新建設に向かわしめる一つの動機たるべき運命をもっていた。まさに皮肉ともいうべくあまりにも冷厳なる dramatische Dialektik である。

(13) *Wied. Ann.* 19, S. 782 (1883), *Ges. Werke* I, S. 242; *Wied. Ann.* 45, S. 28 (1892) 彼の師ヘルムホルツも同様にエーテル内の縦波ではないかと考えた。ヘルツの *Ges. Werke* I の序文 S. XXV。

(14) *Wied. Ann.* 51, S. 225, 52, S. 23 (1894) レーナルトはノーベル講演では、通常電子といわれるものを電子そのものの Quanta と呼び、物質粒子と見ず、これに対して光量子は kohärent なエーテル波列としている。ヘルツの意見がよほど影響しているのであろうが、真に師に忠実とは言われまい。

(15) Cathode Rays, *Phil. Mag.* 44, p 298 (1897) 前触れは Electrician, 21 May (1897)。

(16) 一般に陰極線については、初期の文献として、上記レーナルトのノーベル講演第二版のほか、A・シュスターの講演、G. C. Schmidt, *Die Kathodenstrahlen.* 2te Aufl. (1909) を参照。

(17) *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leiden (1895)

(18) *Proc. Amsterdam.* Bd. 5, S. 181, 242 (1896) ローレンツの説明をともなっては *Phil. Mag.* vol. 43, p. 226 (1897)

(19) X線発見の歴史は O. Glasser & M. Boveri, 'Wilhelm Conrad Röntgen, and the early history of the Roentgen Rays' (1934) が優れているといわれるが、繙読の機を得ない。

〔1〕「科学的発見の歴史のかなりの部分は科学的な機器や装置の歴史である。」（A・シュスター『物理学の進歩』五二ページ）。

〔2〕より適切には「熱陰極真空管」。S. Dushman 前掲書二ページ。

〔3〕真空中に設けられた小さい羽根車が光の作用で回転するように作られた装置。

〔4〕選集版では「最高」。

〔5〕以下四行ほどの部分は文脈が混乱しているが、内容は本書八〇ページ、二〜九行とほぼ同じである。

〔6〕「……視界の狭さのゆえに、独特の偏見で見ているところが多く……」の意か？

§7　ボーアの原子構造論への理論的道程

しかし、われわれは本来の意味での原子構造論の発展に立ち入るまえに、十九世紀の末年から今世紀の初頭にかけて理論物理学界に重大な役割を演じたローレンツの電子論に触れないわけにはいかない。これは古典物理学を新しい世紀の物理学へ媒介する役割を果したからである。

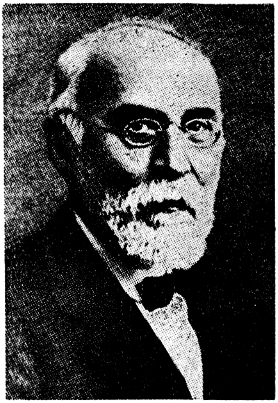
ヘンドリック・アントーン・ローレンツ（一八三五—一九二八）は、若年にしてマクスウェルの電磁論の研究家として知られたが、一八九二—九五年、電子論の提唱により、[1]当時の理論的研究に新生面を開拓することになった。

彼は物質の光学的・電気的現象を帯電微粒子——彼自身やJ・J・トムソンらが初めは ion と呼び、のちにドルーデによって electron と名づけられた——によって基礎づけようと試みたが、このローレンツのイデーを広く学界に承認せしめたのはゼーマン効果の理論的解明であった。

そのころ、K・オンネスの研究所にいたP・ゼーマン P. Zeeman（一八六五—x（一九四三））は、まず食塩のD線について、この光源が十分強い磁場におかれる場合には磁場の方向により、線が二重あるいは三重項に分岐することを発見した（一八九六）。この事実はじつは、すでに前年に発表され

ていたローレンツの電子論中の一つの帰結、磁場内で調和的に振動する電子の理論から期待せられるところにほかならなかった。これは従来、理論的に手を染められなかった線スペクトルが電子の振動に由来することを最初に確証したものとして重大な意義がある。それのみか、ローレンツはさらにこの線が円偏光をなすことを理論的に注意して見事実証され、この振動する電子の荷電が負であることが確かめられ、また分岐した線の間隔から推論される電子の比電荷が陰極線の電子から得られたものと同程度であることが間もなく明らかとなるに及んでは、これが学界に注目をひき、電子論の将来に大きな期待を抱かしめたのは当然であった。

そこでローレンツ自身やP・ドルーデその他の人々は、電子論を金属に適用してその電気的性質を説明しようと試みた。すなわち、金属の内部に自由に飛動する多数の電子、いわゆる electron gas〔電子気体〕を想定して電気伝導度、熱伝導度を計算して、その比は経験的に見出されたヴィーデマン－フランツの法則とほぼ一致する〔との〕結果を得た。〔また電子論は〕接触電位差や、光の分散、物質の磁性の説明にも適用されて、有望に思われた。


H. A. ローレンツ

他方ローレンツは、これらの電子をもって物質内部の電磁場の方程式を導き出し、ことに運動物体に対してはヘルツが成功しなかった実験的事実に適合する結果に到達し、これから発生した諸問題がのちにアインシュタインに理論的手懸りを与え、ついに相対性理論に深化されたことは周知のとおりである。かくして、このローレンツ

の電子論が実在の深みに触れる何ものかが認められなければならなかった。

それにもかかわらず、この電子論が重大な点において致命的な欠陥を含むことも研究の進展とともにしだいに明らかとなってきた。すなわち、最初は電子論に輝かしい証明を与えたかに見えたいわゆる「正常」〔ゼーマン〕効果は、きわめて簡単な構造を有する線についてのみ見出される現象であり、ゼーマンが最初にそれを発見したのは偶然であり、これよりもはるかに複雑な**「異常」ゼーマン効果**のほうがかえってしばしば起こるものであることが明らかとなったが、この後者に対しては、ローレンツのあらゆる努力にもかかわらず、彼の理論を遂行することはまったく徒労であった。（これは「正常」ゼーマン効果の場合には波数の変移$\Delta\nu$の式に作用量子hがあらわれず、量子論的効果が潜在的であるために、偶然ローレンツの簡単な理論が成功したことがのちに判明した。）さらにこの「古典的」電子論は、固体の原子熱に関するデュロン－プティの法則と調和しがたく、黒体輻射に応用してもレイリー－ジーンズの式が出てきて実験と一致しないが、これらはエネルギー均等配分則適用の結果である。

以上のような欠陥にもかかわらず、ローレンツの電子論は、一方において古典電磁力学を相対性理論へ、他方において、電子振動によってスペクトル線を基礎づける意味において原子構造論への重要な捨て石となることにより、歴史的意義をもつものである。[2] これはまたソルヴェイ会議の議長等により、新旧物理学者をつねに調停して学界の世話をしたローレンツその人の公生涯が果たした役割で〔も〕あった。

原子的過程の知識が深まるにつれて、原子の構造についてもしだいに科学的な理論が芽生えてき

た。

英国物理学界の長老ケルヴィン卿がかつてヘルムホルツの研究と古いデカルトの渦動宇宙論とからヒントを獲(え)てエーテルの渦動原子のモデルを提唱したのは有名なことであるが、彼は一九〇一年ボッシャ教授の祝賀論文集に「Aepinus atomizied〔エピヌス電気流体を原子に分ける〕」という論文を寄せた。エピヌス Aepinus（一七二四―一八〇二）は電気の一流体説を唱えた人で、[3] それによれば、可秤物質の原子のうちで electric fluid〔電気流体〕と呼ばれるものが、ある自然量 a natural quantum を超えたときには正に帯電し、不足の場合には負に帯電する。[4] ケルヴィンは、このエピヌスの流体を取り上げ、それはエレクトリオン electrion（electr-ion）と呼ばれるきわめて微小な、可秤物質の原子よりもはるかに微小な、等しい相似の原子からなり、正に帯電した球の内部に数個の負のエレクトリオンが入っているとした。[5]

今世紀の初頭、有名であったJ・J・トムソンの原子模型は、このケルヴィンのエピヌス原子の考えを精密化したものであった。トムソンは一九〇三年、アメリカのイェール大学へ招かれておこなった Silliman Lecture「Electricity and matter〔電気と物質〕」のなかで、[1] 原子の大きさの程度の陽電気の球の内部に存する陰電子の運動エネルギー[6]があまり大きくなく、その陰電子が多数で、球中心に対して適当な環状で配列していれば、その円運動によって生じる電気エネルギーの輻射は、したがってまた corpuscular cooling〔電子温度 corpuscular temperature[6] が下がって原子が他の原子と融合すること〕は、無視しうるくらい僅かとなり、いわゆる原子の安定が保証されることを暗示し、翌一九〇四年の *Philosophical Magazine*〔(6)7, p. 237〕にはその詳細な計算を発表している。[7]

このJ・J・トムソンの原子模型は、原子の不安定を意識的に避け、いやしくもすべての科学的原子模型に要求されるシャープな本質的に単色な「スペクトル線」を電気振動の結果として古典的理論で導いた点に特色がある。これは、大いさの点でも一定の規準があり、ことに電子が平均の位置から変位すると、それに比例する力で元へ引き戻される点は、P・ドルーデやH・A・ローレンツらが理論光学の電子論的基礎づけに仮定したものと同等であるので、分散・吸収の理論およびゼーマン効果の説明に役立つので学界に賛成者を見出した。

しかし、スペクトラムの規則性という点では、簡単な水素のバルマー系列さえ説明できないのは何といっても欠陥であり、陽電気の球がいかにして相互に反撥して破裂してしまわないかもまったく不明というほかはなかった。[8]

わが国物理学界の先覚、長岡半太郎博士が、原子模型を提出し、世界学界の注目をひいたのも、ちょうどJ・J・トムソンと同じころであった。わが国は日清戦争以後、産業の発達目覚ましいものがあり、電気事業も徐々に勃興し、就中明治三十年代にはいっては、海軍を中心とする無線電信の研究等がおこなわれはじめた。こうした時代に何らかの影響を受けたかいなか、長岡教授は夙にファラデイ、マクスウェルの研究に親炙し、電磁気学にはとくに秀で、ニッケルの磁歪 magneto-striction の問題や少しのちのコイルの自己および相互感応の係数の計算で、当時の若いわが物理学界にあって、欧米に認めしむるに足る独創的業績を生みつつあった。[9]

日露の風雲も急な明治三十六年十二月五日（一九〇三）東京数学物理学会の常会において、長岡教授は「すぺくとる線ト放射能ヲ表示スベキ原子内分子ノ運動」についての理論を発表した。[10] これ

によれば、原子の理論では、スペクトル線の規則性が問題であり、これにはバルマーその他によって与えられた公式に適合するような振動を起こすような系を見出さねばならぬ。そこで、ロッジが彼の「エレクトロン」講義のなかでマクスウェルの Saturnian system〔土星系〕へ注意を促したのを取り上げ、原子の模型として、中心に質量の大きな正電気を有する粒子があり、周囲にはマクスウェルが相互に牽引する粒子を置いたのに対して、相互に反撥する各々等しい質量をもった小粒子を置き換え、そこで中心の牽引力さえ大きければ、小さい擾乱に対しては、かような系が安定であることを計算によって証明しようと試みた。その壮(さか)んなる意気は論文の行間に溢れ、当時のわが学界に与えた衝動は察するにかたくない。この計算は間もなくショットが指摘したように欠陥があったが、その間の論争によって学界に投じた一石はけっして無益ではなく、H・ポアンカレがその著書で幾度か長岡博士の原子模型に言及したのは人も知るところである。[11]

放射線に関する実験の進歩にともない、J・J・トムソンは彼の原子模型によるαないしβ線の擾乱を理論的に導いたが、ガイガー－マースデンがα粒子が薄い金属箔を通過する際、90°を超えるような大きな屈曲をする事実を観測したことは、[12]トムソンの理論と直接に矛盾する。

そこでラザフォードはトムソンの模型を排し、原子の質量の大部分をきわめて小さな空間に凝結した陽電気の核をもつ、遊星系型のモデルの必然性を主張するに至った。[13]「核の荷電 $E=Ze$ の e は正の基本荷電、Zはヴァン・デン・ブレックの仮説によれば、元素の原子位数(ママ) atomic number を表わす数にほかならない。この核を中心とし、そのクーロン力の作用を受けつつ、負荷電の電子が

周囲を運動する」。この点、長岡博士の模型と同様であり、ラザフォードは「長岡教授がこのモデルの安定を証明したのは興味あることだ」として、自説の支持に援用している。(14)

「原子の不安定」とここで言われているのは、古典電気力学によると、たとえば遊星運動をする電子のように加速度運動をする荷電物体はエネルギーを輻射し、きわめて短時間のあいだに全運動エネルギーを失ってしまうので、周回（ママ）する電子は中心の核のなかへ陥って、元素が一定の化学的性質を保持する事実とすら矛盾するのである。

物質のスペクトル線をその電気的構成部分の振動に帰することが、古典電気力学から見てさらに重大な難点をともなうことは、すでに古くマクスウェルやケルヴィン卿にさえも一応は感得されていたことである。すなわち、スペクトル線が原子の別々の振動をあらわすとすれば、エネルギー等配分律によって各々はRTのエネルギーに相当し、n個の線をもつものはnRTとなるはずであるが、事実は、たとえば水銀は$\frac{3}{2}RT$であり、まったく原子の並進運動のエネルギーで説明されるものしかない。これらの理由から、〔ローレンツ〕はエネルギー等配分律には終生反対したくらいであった。一方、多くの学者が注意していたように、スペクトル線の諸系列を通ずる簡単なリッツの結合法則、すなわち「一つの原子系が発射・吸収する輻射の振動が、その原子系に特有な数列中の二数の差で与えられる」という分光学上の経験的規則は、古典的振動論から考えられる、振動数が基礎数の整数倍をなすという関係からはまったく説明できないのである。(15)

このようにして、幾多の新発見の材料をもってしても、原子の構造は依然として大きな謎であった。

「しかしながら」この種の問題の考え方は、数年前からエネルギー輻射〔論〕の発展とこの理論に導入された新しい仮説の直接の肯定とによって、本質的な変化をこうむっていた。ソルヴェイ会議の討論の結果は「原子的な大いさの系の有様を記述するのに古典電気力学は不適当だということの一般的承認を意味するものではなかったか」、「電子の運動の法則の変化がいかなるものであるにせよ、問題の法則中に、古典電気力学に無縁な一つの量〔である〕プランクの常数、すなわち作用の基本量子 the elementary quantum of action と呼ばれるものを導入することが、必然的であるように思われる」(ボーア)[16]。



N. ボーア

ボーアによって明確な方法論的意識をもって量子仮説が原子模型へ適用されるまえにも、これを試みたものは絶無ではなかった。時は熟していた。

A・E・ハースはJ・J・トムソンの模型でプランクの常数の意義を明らかにしようとして、原子の大いさや、発射されるスペクトル線の振動数についての計算が、観測された値と大いさの程度〔について〕は一致することを示した。すなわち、ハースは、リュドベリ常数の$1/4$倍[2]に相当するものを見出し、これとh(作用量子)およびe/m(電子の荷電と質量の比)の仮定によって $e=3.18\times10^{-10}$e.s.u. を見出した[17]。この値は今日から見れば小さいが、当時の実測値とはかなり一致したの

である。これは学界に注目され、ソルヴェイ会議ではプランクがこれを批判し、ローレンツやランジュヴァンとのあいだに熱心な討論もおこなわれた。しかしハースの説もJ・J・トムソンの模型の欠点はそのまま担っていた。

J・W・ニコルソンは、一連の論文において、[18]ラザフォードと同様の太陽系型の原子模型を利用し、その系のエネルギーと電子環の旋回の振動数の比がプランクの常数の整数倍ないし整数の簡単な函数であると仮定することにより、星雲および太陽のコロナのスペクトラムについて、異なる群の波長の比がきわめて正確に説明されることを示した。かような原子構造論がボーアにきわめて力強い影響を及ぼしたことはもちろん疑いのないところであって、角運動量とプランクの常数との関係が重要であることをニコルソンが指摘したのは卓見であり、ボーアの初期の論文では繰り返しニコルソンの結果との比較がおこなわれている。

しかし、のちにボーアも指摘したように、ニコルソンの計算では、スペクトル線の振動数は系の力学的な振動と同一視されており、それが系のエネルギーに比例するので、これがために、発射が始まるやいなや系のエネルギーは減衰し、有限量の単色線 homogeneous radiation を発しえず、バルマーやリュドベリの規則を導くことができない。すなわち、従来の遊星型模型と欠陥を同じくすることも注意せねばならぬ。

かようにして原子構造の神秘の扉が開かれる日は一歩に迫った。このころ、デンマークの青年学徒として英国に留学し、まずケンブリッジのJ・J・トムソンのもとで、ついでマンチェスターの

ラザフォードに従って研究していたのがニールス・ボーア Niels Bohr であった[19]〔一八八五 10/7—x〔一九六二 11/18〕〕。彼は留学の直前、その学位論文[20]においてローレンツの古典電子論を金属電子の非平衡状態や反磁性の問題に応用して、その帰結を彼一流の anschaulich〔直観的〕な取扱い方で追及した〔が〕、古典論がついに実験的事実を解明しえないことを痛切に体験しなければならなかった。これは彼をして、量子論へ赴かしめる一つの機縁ともなったであろう。しかし、英国留学はさらに実り多き経験であった。

時はあたかもラザフォードが長岡博士の模型を実験的に結論した直後であった。ボーアは感謝に充ちた言葉で回想する。「今から約二十年程前にケンブリッジとマンチェスターの物理学研究所を訪ね、偉大な指導者たちのインスピレーションのもとに研究する幸運に恵まれたものは誰でも、私自身もそうであったが、いままで隠されていた自然の姿がほとんど毎日のように露(あら)わにされてゆくのを見るのはまことに忘れがたい経験であった。私は、原子核の発見によって開かれた物理・化学の全体に対する新しい展望が一九一二年の春、ラザフォードの弟子たちに討論されたあの熱心さをまるで昨日のように記憶している」。

ボーアは一九一二—一三年の冬学期にはすでにコペンハーゲンの大学に帰り、講師として講義をしていたが、ここで彼の不朽の業績たる原子構造論が樹立されたのである。

原子構造論におけるボーアの創見は、上に述べたところから明らかなように、原子の問題と作用量子とを結びつけた点にあるのではなく、さらにまた遊星系原子模型と量子論の結合でさえもない。彼はスペクトル線の説明を企てた上述のような幾多の理論の不満足な結果に鑑みて、「原子内の過

程を決定する諸法則の知識が欠けていることを考えると、それらの理論が企てられたような説明を与えることはほとんど不可能である。われわれの通常の理論的諸概念の不適当なことは、近年、温度輻射の法則の理論的・実験的研究から獲(え)られた重大な諸結果からとくに顕(あき)らかになってきた。そこで自分がスペクトルの法則の説明を提出しようとしないのも了解されよう。これに反して自分は、スペクトルの法則を、科学の現状を基としてやはり同じように説明できない諸元素の他の種々の性質と密接に関係づけうるような道を指摘しようと思う[21]」。このようにボーアは、まず新しい方法論的見地に立つ。

「われわれはここでほとんどまったく処女地に立っている。そこで新しい仮定を導入するに際しては、実験と矛盾に陥らぬようにひたすら注意せねばならぬ。これがどの程度まで避けられるかは時が示すであろう。しかし最も安全なのはもちろん、できるだけ仮定を少なくすることである」。

「Theory of stationary states〔定常状態の理論〕」と自ら呼んでいるとおり、ボーアの理論の根本仮定は次の二つであった。

「(1) 定常状態における系の力学的平衡 dynamical equilibrium は通常の力学を援用して論じうるが、この系の異なる状態間の遷移は、かかる基礎の上では取り扱えない。

(2) この過程は、均質な輻射にともなわれ、これに対する振動数と発射されたエネルギーの量との関係はプランクの理論で与えられるものである[22]」。

ここに「定常」状態とは、その間に種々のスペクトル線に対応してエネルギーの発射がおこなわれるような或る種の waiting places〔待受け場所〕を示すのみである。この根本仮定を根拠づけて

ボーアは「通常の力学が絶対的確実性をもちえず、単に電子の運動の或る種の平均値の計算で成り立つにすぎない」ことはすでに知られているし、「第二の仮定は電気力学の通常の観念とは明白に対立するが、実験的事実を説明するには必要と思われる」と述べたが、彼も認めたとおり、アインシュタインのエネルギー量子の発射・吸収のイデーに啓発されていることは一見して明らかである。

これらの根本仮定から水素のスペクトラムに進むには、ラザフォードの遊星〔系〕型原子を用い、当時として通常の力学以外なんら用うべき手段がないので、それによって定常状態における電子の振動数の計算をおこなうほかはない。(23)(24)

「このきわめて簡単な、いわゆる核外電子のモデルと仮定とは、一方に原子の安定性の新規な基礎となるとともに、他方では、原子から発射される輻射線の性質と電子のなんらかの運動とのあいだに直接の関係を想定することを諦めしめることにより、古典的自然記述に無縁な作用量子に条件づけられた個別性を正しく取り上げることを可能にしたものである」(25)。「普通に説明と言われているものを与えようとしたのではけっしてなく、ここで、輻射がいかにして、あるいはなにゆえに、発射せられるかについては何も言われていない」ことには初めからボーアが注意を促したのである。すでにここで「直観性と因果性に対する日常の要求を意識的に諦めること」によってスペクトル線の特異な規則性が導かれた。(26)個別的遷移過程のメカニズムは、それをさらに詳細に説明することはできない。

しかし、かかるスペクトル系列の公式を力学的に基礎づけるとき、そこには単なる記述から本質論への発足があったのである。

ボーアが水素原子のバルマー、ピッカリングらのスペクトル系列に与えた理論、リュドベリの常数の導来等については、周知のことであるから、ここで立ち入る必要を認めない。彼は最初の労作ですでに楕円軌道の可能性や電子の運動の相対論的修正等にも考慮をはらい、多電子原子および分子、陰極線による衝突の問題等にもヒントを与えているが、しかも一方には、これらの考慮の「暫定的で仮説的 preliminary and hypothetical な性格」も十分意識していたのである。

これから数年間というものは、ボーアの原子構造論の勝利の行進であった。ゾムマーフェルト、ウィルソン、わが石原純博士は、ほぼ同じころ量子条件を一般化したが、正常ゼーマン効果はもちろん、トムソンの模型が行き詰ったシュタルク効果、あるいは、かの若くして戦線に死んだモーズレイのX線吸収スペクトルの体系化等は、いずれも見事な理論的根拠を得、他方ではフランク－ヘルツの衝突実験は、エネルギー準位が存在することを実証した。

なかでも、ボーア自身による、化学元素の性質を原子構造論から系統づける試みは、とくに成功して、かの周期律表の神秘の数8もここでまったくその本性を顕わにした。[27][28]かようにして、機械的に説明されなかった化学元素の安定性が解決されたばかりでなく、物理学は量子のイデーを原子構造に導入することによって、無性質の単なる Mechanismus〔機械論〕の抽象的一般性から解放され、化学の特殊性を止揚し、ともすれば数学的自然科学そのものの限界とされた質的なものの支配性を獲得することになった。[29]

さらに、ゾムマーフェルトが水素その他の原子へ電子の相対論的質量変化を導入したところ、そ

れがスペクトラムの微細構造を見事に解明するかに見えたことは、量子論と相対性理論の勝利をますます確実にするものと考えられた。(30)

(1) *Arch. Néerl.* 25, S. 363 (1892), Versuch einer Theorie der electr. u. opt. Erscheinungen in bewegten Körpern (1895) 綜合的成果は *Theory of electrons* (1907) に見られる。
(2) すぐあとに述べるごとく、ボーアがローレンツの電子論の立場から、金属内電子を取り扱ってついに成功しなかった(一九一一年)ことが、彼の古典的電子論の立場を脱却せしめる一つの動機ともなったであろう。
(3) F. Ulrich Theodor Aepinus, *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*, Rostock (1759) p. 36 にありという。
(4) I・ラーマーは正負の電子はたがいに他の mirror image〔鏡像〕であるとした(一八九四)。*Trans. Roy. Soc.* 185, p. 821 (1894); *Æther and matter* (1900) このラーマーの後を襲ってケンブリッジの Lucasian Professor になったのが電子の空孔理論を提出したディラックである。
(5) *Phil. Mag.* 3. p. 257 (1902) をも参照。
(6) トムソンはここで[3] corpuscular temperature という概念をつくって molecular temperature に対照させているが、のちの原子核の取扱いでボーアが同様の概念を用いたのは、学者の記憶に新たなところであろう。
(7) *Nature*, vol. 67, p. 601 (1903)
(8) J. J. Thomson, *Corpuscular theory of matter* (1907) この模索時代の原子模型や電子に関する初期の論文〔として〕は Oliver Lodge, *Electrons* (1907) が興味がある。なお O. W. Richardson, *The electron theory of matter* (1914) Chap. XX. とくに XXI にはその後のボーア以前の原子構造論の紹介がある。
(9) 一九〇〇年のペリーの国際物理学会にはこの磁歪を報告している。
(10) Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of Radioactivity, *Proc. Tôkyô Math-Phys. Soc.* 〔2〕, vol. 2, p. 92, (1903—4) この表題の逞しさを見よ。*Phil. Mag.* vol. 7, p. 445 (1903) の論文も同じ内容である。Abstract は *Nature*, vol. 69, p. 392 (1904) つづいて *Proc. Tokyo Math-Phys. Soc.* に数篇のこれに関する論文が掲載されている。
(11) *La valeur de la science*, p. 206 邦訳岩波文庫版、一五〇ページおよび *Dernières penesées*。

(12) *Proc. Roy. Soc.* 82, p.495. (1909) ラザフォードによるトムソンの模型と比較は *Camb. Phil. Soc.* 15 part 5 (1910) にありという。すでに一九〇三年レーナルトは彼の陰極線の吸収に〔関〕する研究から、原子の質量はほとんどきわめて小さい中心部に集まり、それのみが不可透入的で力の中心となるので Dynamiden と呼んだ。各原子中の Dynamiden の数は原子量に比例する。これはラザフォードのと非常に似ているが、ただ、原子番号2の原子には二個の Dynamiden が離れて存在するとしたのは欠陥であった。*Ann. d. Phys.* 12. S. 714 (1903) なお Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*, S. 13 (1924) 参照。

(13) *Phil. Mag.* 21, p.669 (1911)

(14) したがって、ドゥ・ブロイがラザフォードのモデルはペランの暗示を採用したと書いているのは不適当である。物質と光（岩波新書）上、一〇一頁。

(15) 化学的原子の最も著しい性質は、その definiteness と permanency であるが、ジョゼフ・ラーマー卿は、物質が古典電気力学に支配される電子からなるとすれば、この definiteness は説明できないことを指摘した。*Æther and matter* (p.189)

(16) N. Bohr, On the constitution of atoms and molecules, *Phil. Mag.* 26, p.1 (1913) July これが原子構造に関するボーアの最初の論文である。

(17) *Sitzungsber. Wiener Akad.* März (1910), *Jahrbuch d. Rad.* u. *Elektr. Bd. 12.* S.261 (1910)

(18) *Monthly Notice of Roy. Astr. Soc. 72*, pp.49, 139, 677, 693, 729 (1912)

(19) ボーアの伝記は仁科芳雄氏 Niels Bohr（岩波講座物理学）参照。

(20) Studier over Metallernes Elektrontheori, *Dissertation*, Copenhagen (1911)

(21) On the spectrum of hydrogen, 一九一三年十二月二十日、コペンハーゲンの Physical Society での講演。*Fysisk Tidsskrift*, vol. 12, p.97 (1914) に載り英訳された論文集。*The theory of spectral and atomic constitution*,（以下、*TS. AC* と略す）(1922) に収められている。ハイゼンベルクの量子力学の出発点がいかにこの Bohr の見地に酷似しているかを見よ。

(22) 第1論文 (On the constitution of atoms and molecules. *Phil. Mag.* (6) 26. p.1 (1913)) での表わし方をそのまま引用する。後年の表現はより形式的になっている。

(23) Bohr; *Ann. d. Phys.* 32, S. 5 (1938)

(24) ここにボーアの原子論の非論理的な折衷性がきわめて明瞭に露われている。後年の行詰りはここに胚胎した。それ

にもかかわらずわれわれは、ちょうどプランクの輻射式の導来にも中途まで古典電気力学が用いられたことを想起して、論理的に不完全な理論を通して事物の核心に徹した直観の深さを認めないわけにはいかない。

インフェルトも、ボーアの理論は自分の登っている樹の枝を自分で切り落としているようなものだが、新しい最初の試みが不完全であるのは当然であるから、この道をすすめればよいと言っている。

(25) 後年の correspondence の考え方の最初の萌芽がここに見られることはボーア自身が注意した。*TS. AC* 序文、V. 寺田寅彦博士は、当時のボーアにプラグマチストの態度を看取しておられる（全集第八巻 p. 249)。

(26) N. Bohr, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*（以下、*AT. NB* と略す）(1930) S. 70～71

(27) 一九二一年十月コペンハーゲンの Phys. & Chem. Soc. での講演。*Fysisk Tidsskrift*, 19, p. 153 (1921) 所載（*TS. AC* 所載)、このボーアの説から間もなく、コスターとヘヴェシイが第七二新元素ハフニウムの発見（一九二三）に導かれたことは有名である。

(28) のちにパウリの二つの電子は同一の量子状態にありえないという排他原理により、週期律表は直接に電子の順次添加として説明されることになった。

(29) ボーアの比較的に現象論的な系統づけに対し、G. N. Lewis, *Journ. Amer. Chem. Soc.* 38, p. 782 (1916), J. Langmuir, ibid. 41, p. 868; *Proc. Nat.. Acad.* 5, p. 252 (1919) は幾何学的な原子模型によって週期律表を説明しようとした。彼らの構想は、プラトンが『ティマエウス』のなかで夢想した元素の幾何学的構成イデーを科学的にしたものと言える。直観的モデルとギリシャ的な形の思想の連関はここでも見のがせない。

(30) ゾムマーフェルトは明らかに遊星軌道に関するケプラーの法則とのアナロジーから電子に楕円軌道を仮定して、ボーアのエネルギー準位とまったく同じ結果を得た。しかし、軌道の形に、ボーアの円が一つであるのに楕円という他の可能性が加わった。これは一見計算を複雑にしたのみで無効な一般化に見えたかも知れぬが、スペクトル線の微細構造を説明するためには、相対性理論による質量変化の補正を入れると見事に以前の可能性が有効になってきて、説明が成功する。これがまたゾムマーフェルトの理論では予言する可能性が多過ぎるので、ルビノヴィッツの選択規則が必要になり、ある種の観測されない線は禁止しなければならぬ。

〔1〕 選集版では「電子の大きさ……」。

〔2〕 選集版では「……Haas, Rydberg は常数の8倍に……」。

〔3〕 選集版では「Thomson は之を……」。

§8 過渡期の量子論[1] I ——対応原理を中心として

ボーアの原子構造論の最初の論文が発表されてから約十年、物理学史上にも稀に見る輝かしい成功としてこれは広く一般に大衆化されたのであったが、その普及されたのは、原子は太陽系と似た構造をもつという直観的に通俗化された形態においてであった。ボーア自身もこのころには、たとえば一九二二年十二月のノーベル受賞講演に見られるように、まず一般公衆に理解されやすいものとして太陽系とのアナロジーを説いた。[2]

しかし、そうした場合ボーアはつねに、それがどれほど一般的に印象されたかは疑問であるが、原子が太陽系のような古典力学の対象とは本質的に異なる独自の安定性を有し、それが古典力学からはまったく解決されないものであることを強調するのを忘れなかった。[3] 事実このころにはボーアその人を含む第一線の学者たちには、この有名な原子模型はすでに重大な疑惑につつまれたものとして見られたのである。直観的な模型が通俗的に普及していくのとは反対に、原理的研究は原子からしだいに直観性を剝脱し、ますます抽象的な方向へ進んでいった。

この方向をとくに顕著に代表したのはボーアその人であって、彼が前期量子論の難局時代に発表

した「量子論の根本要請」[4] という論文などは、その模範的なものと言えるであろう。彼はこの論文の冒頭で、まず量子論の不連続性の導入によって、われわれの日常概念からの理論の脱離が深刻な性格を有することを強調する一方、「しかも現在の物理学の見地からすれば、自然過程のすべての記述は、古典理論によって導入され定義された概念の基礎に立たねばならぬ」と主張し、量子論の諸原理をその適用が矛盾をきたさぬように表現することはそもそも可能であるかどうかという問題を論及しようとした。

そこでは彼の原子理論の仮定は次のような形をとるに至った。

第一根本要請は、古典力学的に考えうる原子系の運動のうちから定常状態という特異な「**安定性**」を有する状態を仮定するものであったが、これは、ハミルトンの正準運動方程式を解くために、運動が**週期的性質**をもつとして初めて定常状態を決定すべき解の可能性が得られるという点で特徴的な制限をもっていた。そこで、単一または多重週期系の定常状態を、古典的に可能な状態から選び出す条件、すなわち量子化 quantization の規則は、いわゆる作用変数Jを用い、n自由度の系について

$$J_1 = n_1 h,\ \cdots\cdots,\ J_n = n_n h$$

の形で得られた。

第二根本要請は、輻射線（振動数ν）の発射は、原子の二つの定常状態（そのエネルギーE'、E''）間の遷移過程に

$$h\nu = E' - E''$$

というわゆる振動数条件 frequency condition を規定するものであったが、この条件が直截に表現するように、「かかる遷移過程は、初めの状態のみならず終りの状態にも現実に依存することを仮定する点で、通常の自然記述法をまったく脱却するものであった」。

こうした根本要請の表現にも、一九一三年のそれ（前節八八頁）に比して一歩一歩モデル的な思いつきから解放されて形式化し、批判的になっているのがうかがわれる。

半ば古典的な見地を克服して新しい量子論の建設へと困難な径路をたどったこの過渡期の量子論の一般的方法を代表する二つの原理がある。それはエーレンフェストの断熱原理 Adiabatenprinzip と、ボーアによって提唱された、より重要な対応原理 Korrespondenzprinzip である。これらの原理は、当時用いられた様式からでなくその本質から見るならば、古典力学と量子論との関係を闡明する上に大きな示唆を与えるものである。

すでに一九一一年ブリュッセル Bruxelle の第一回ソルヴェイ会議の席上で、H・A・ローレンツは、次のような問答を紹介した。「単振子の糸を二本の指でつまんで、そのあいだから糸を引いて縮めるとする。振子がはじめにその振動数νに相当するエネルギー要素をもったとすれば、しまいにはそのエネルギーは新しい振動数に相当するエネルギー要素 Energieelement に足りなくなろう」。ところがアインシュタインはこれに答えて、「もし振子の長さを無限に緩かに変えれば、振動のエネルギーはνに比例して変わり、つねに一つの Energieelement に等しい」と言い、ローレンツはこれをきわめて注目すべき結果とした。

これがのちにＰ・エーレンフェストによって定式化された断熱原理 Adiabatenprinzip の芽生えであった。なぜなら上述の比例常数は断熱不変量を示すからである。エーレンフェストは最初、空洞輻射の問題にこれを適用し、のちに一般化したのであるが、[5]「断熱」の名はもちろん力学から由来するもので、ちょうど熱力学における断熱的状態変化が、直接〔に〕熱変化を規定する量〔について〕ではなく、間接に体積その他の系の条件の変化を(ママ)熱平衡の逐次的経過によっておこなわれるように、もしも量子論においても、外部からの作用が、直接運動の座標にではなく系のパラメーター（たとえば固有振動数、外部の場の強さ等、上述の例では系の長さをパラメーターと考えうる）に、無限に緩かに可逆的に、系の運動の位相に特定の関係をもたずに適用されるならば、これによって生ずる変換に際して量子条件は不変にとどまるのである。すなわち量子数や各定常状態の確率は上の変換に際して断熱的不変量 adiabatische Invarianten にほかならない。

　この原理によれば、きわめて簡単な一つの運動状態について量子条件が得られれば、断熱変換によってこの運動状態にもたらしうるすべての運動状態についての条件は前者から得られるのである。たとえば粒子の運動平面に垂直な磁場を媒介として、中心運動の量子条件を非調和振動子のそれに帰着させることができるが、さらに捉えがたく複雑に見える問題がこの方法で容易に解決できる。それはたとえば、シュタルク効果の計算に見られるところである。

　それればかりではない。ボーアによれば、二つの定常状態のエネルギー差の決定も、その相互間の直接の転移は古典力学ではまったく取り扱えないにもかかわらず、もし、断熱原理によって、すべての定常状態のエネルギーが無限に僅かしか異ならぬ系へ変換すれば、それを古典的に計算するこ

とすら可能である。そこでボーアはこの原理を「力学的変換(ママ)可能の原理 Prinzip der mechanischen Transformierbarkeit」とも呼んで、[6] その方法論的意義を強調したのであった。かようにして断熱原理は、その制限のもとで、古典理論を足場として量子論的計算を開拓せしめ〔たのであって、これは〕、第一根本要請が許す古典理論適用性の拡張と見なすことができる。

ここでわれわれは古典力学の開拓者としてのガリレイがしばしば用いた「連続性の原理」(マッハ)を想起する。ガリレイは斜面上の落体運動を取り扱う際、斜面を徐々に水平にしてその「極限」の場合に慣性の法則を見出している。[7]

しかしながら、この連続性と極限の思想を、断熱原理から包蔵することこそ、一面においてそれが現実の過程を支配する法則と古典概念の連続的法則との根本的差異を隠蔽するものと考えなければならないが、反面において、この原理の前提するところを分析するならば、それが古典力学の歴史的性格を、したがってまたその限界を暗示するものにほかならない。すなわち無限に緩かに変化するとしては考ええない、急激にもしくは飛躍的に変化する外部の影響、たとえば原子系に対する外部からの輻射の作用、電子の衝突のごときは、明らかにこの断熱変換の条件の埒外であり、事実ここでは古典力学は成立しない。[10]

しかもなお、第一根本要請や断熱原理の内容は、ともすれば定常状態またはその拡張された場合には古典力学が適用されるというふうに解釈される懼(おそれ)なしとしない。もしその解釈のごとくであるならば、結局においてそれらの説くところは量子論と古典論との鋭い矛盾を和らげ、両者の併立、折衷、混淆を許し、ついには理論的不整合をきたすものと言うべきである。

対応原理の使命は、まさにこのような自然発生的段階の理論に批判の意識をもたらし、量子論と古典理論との関係そのものを自覚的に把握する点にある。[11]

もっとも対応原理そのものの定式化にも、この自覚性は漸次に現われてきたのであって、その原始的な形においては、古典理論において、光の性質とそれを発射する荷電体の運動とが関係づけられていたように、量子論においても、われわれが観測する輻射が原子系の定常状態間の遷移過程によって発射されるとすれば、その輻射の性質にはその状態における原子中の運動の調和的成分が「対応」していることを想定するものであった。

これは古典論と量子論との限界領域ともいうべき、量子数が大きく、それに比して量子数の差が小さい遷移過程を考察するならば、この場合には量子振動数は古典的に計算される振動数と一致する。すなわち、両者の関係は Differenzenquotient〔定差商〕と Differentialquotient〔微分商〕の関係となる。さらに、一般に、この限界領域においては、量子論の統計的結果はあらゆる点において古典論のそれと漸進的に一致するものといえる。

一見すると、この原理をJ・A・クルトコッフが「Analogieprinzip〔類推の原理〕」と呼んだのはもっともなことに考えられ、発見法的な役割をよく把んだかに見える。しかしボーアも注意するように、この原理は、限界領域における両理論の差違の「漸次的な減少」を意味するのではなく、「根本的差違はなお存続する」ことを認めるのであるから、その対立のあいだに成立する対応〔に〕は単にアナロジーという言葉では読みとれない深刻な連関がなければならない。ボーアが初期に「量子論と古典理論との形式的アナロジー」という表現を用いたのを、自ら誤解を招きやすいとし

て〔のちに〕撤回し、「対応原理は純粋の量子論的法則と見なされなければならない[13]」と言った一つの動機もここにある。

対応原理がその当初果たした歴史的役割から言えば、それは、ヨルダンも説くように、「量子現象の未知の法則を感得 aufspüren する指針」であって、エネルギー則、エントロピー則、相対性原理のように完全に定式化された自然法則とは異なり、ボーアをはじめ、当時の俊敏な諸学者が、単に論理的理性の推論のみならず、「本質的直観力」をもって未来の理論を索めていった「方向」を表現するものであるとする[14]のはおそらく謬りではあるまい。われわれは、量子力学が建設されたのちにも〔見られるような、〕「新しい問題を演繹的でなく、古典理論と対応的に korrespondenzmässig 手懸りをつける」という用語法に、その名残りを見出すことができる。しかしこれだけの意味ならば、それは畢竟するに発見法的原理であり、アナロジーというも大した不都合はあるまい。ボーアは限界領域における量子論の統計的結果と古典理論との漸近的 asymtotisch な一致を基礎づけて、「なんとなれば、これによってのみ、古典理論が広範囲に自然現象の記述に確証されている事実が理解されるからである」と言っている。いな、そればかりではない。量子論そのものの数学的形式は、対応原理を媒介として古典理論と関係づけられ、われわれが経験する領域との連関を得るのである。すなわち、単に形式的法則を発見するための道標たるばかりでなく、同時に、かくして見出された法則の物理的解釈を与える点にその特殊の価値があると考うべきである[15]。特定な現象の法則を与える存在的な命題ではなく、古典的と量子的の両存在領域の関係を規定する存在論的な原理である。ボーア－ハイゼンベルクがのちに古典的概念の必要を説いたのは、対応原理のこの一面を解

釈しなおしたものと見ることができる。[16]

しかしこれは対応原理をきわめて一般的に把握した見方であって、歴史的にはそれはどこまでも前期量子論の理論的不完全さを古典理論で補う意味をもっていた。

前期量子論は輻射の振動数を与えるが、古典的光学における振動の形式、すなわち形式や偏光については当初はなんら与えるところがなかった。ところがまさにこの点において、対応原理は有効であった。すなわち現実のスペクトル線の強度と偏光は量子数が大なるにつれ古典的に計算されたそれと漸近的に一致する。量子的遷移過程の相対的頻度は古典的スペクトラムの振幅の比で与えられる。さらに、対応する部分振動が電子運動のフーリエ級数のなかにあらわれないようなスペクトル線の出現を不可能とするいわゆる「選択規則 Auswahlprinzip」も、対応原理の応用例である。

しかし当時の応用例は、まずモデルについて古典理論を適用したことと(ママ)、対応原理はなるほど限界法則として必要条件ではあったが、十分な演繹の根拠ではなかったから、その結果として、その応用は必然的に断面的になり、個々の問題に応じて特殊の取扱いや多少とも技巧的な思いつきを要し、一般性を欠き、たとえば、強度や偏光の決定も完全に一義的というわけにいかず、ある種の任意性 Willkür が入り込むこともやむをえない。古典的振幅を計算する場合、周回電子の初めの軌道についてすべきか後の軌道によるべきか、それとも両者の算術平均によって定義すべき中間の軌道をとるべきかは、当時として難問の一つであった。[17] 量子数の差が量子数そのものと比較しうる程度になれば、そのいずれによるかによって相当の開きを生じる。

さらに、水素の場合にも、その軌道の形が円であるか、楕円であるかによって強度関係がまった

く異なるが、それを取捨する理論的根拠はなく、特殊の技巧を要する。

かように一般的な方法を欠いた当時において、特定の原子模型から完全に独立しえなかった対応原理は、それぞれの問題に特殊の本能的な物理学的直感を要したのであるが、それにもかかわらず、それは断熱原理等に比べて、直接、古典力学の妥当性や原子内電子の運動形態に左右されない質的な内容によって、きわめて朧げながらも、未知の量子力学はこのなかに輪廓をうかがわせ、「今後の量子論の発展は、対応原理の一般化と量的尖鋭化に導くであろう」と予感されるに至った。[18]

以上に述べてきたような諸原理をもって難航をつづけてきたこの半古典的量子論にとって明らかな行詰りを示す幾多の難問があらわれてきた。

その一つは多電子原子の問題である。もちろん、ボーアの太陽〔系〕型原子模型は、前述のようにともかく原子の化学的性質とスペクトラルな性質とのあいだの「性質的 qualitativ」な関係を説明するには有効であったが、一歩数量的計算に立ち入ろうとするとその困難は絶望的であった。シャリエ、ポアンカレの天体力学の多体問題を応用することは誰しも思いつくところであろうが、その数学的困難は別問題としても、すでに原子内電子の相互作用が――自由電子の衝突と同様に――エーレンフェストの断熱条件に適合しない。

しかも一方では、これら多電子原子のスペクトラムは、複雑な構造のなかにも水素のスペクトル線の諸系列と同じ常数を出現し、両者の類縁を明示する。したがってそれら原子の安定性は疑いないことであるにもかかわらず、力学的表象を適用するとそれは不安定なものとしか計算されない。ここに原子の安定性と機械的像との矛盾は、水素の場合に比して著しく尖鋭化する。たとえば、二

つの電子を有するヘリウム原子の励起状態について、幾多の模型の失敗の後、ボーアーハイゼンベルクが[1]周期系の量子条件をそれに適用して振動力学によって計算した結果は、正しいエネルギーの値を与えず、計算精度をはるかに超えて、経験的結果と食い違った。ゾムマーフェルトは、同様な問題を取り扱ったハイゼンベルクの発表されなかった論文に言及し、ヘリウム「問題」はあるが、ヘリウム「模型」は、不安定性のため、語りえないと言っている。[19]

すでに、水素原子においてすら、それが電場・磁場の交叉場のなかにある場合には、断熱条件は——意外にも——満足されない。すなわち、場を適当にすれば、定常状態から除きえないような軌道が核のなかに落ち込むような断熱変換が成立することになるからである。

これと関連して、例のローレンツ電子論以来の難問であった「異常」ゼーマン効果は、さらに一つの古典的モデルに特徴的な難点を明らかにする。すなわちランデがE・バックの異常ゼーマン効果の測定から帰納的に導いた 'Aufspaltungsfaktor' g〔g因子〕の公式は、$J(J+1)$ の形の項を含んでいるが、古典的計算からはJ^2の形しか出ない。これはまさしく、転移が二つの定常状態のあいだにあらわるべき〔であるの〕に、古典的現象からすれば一方の軌道にしか取り扱えないからである。このことは回転スペクトル等の場合に応用される剛体回転子の場合に——量子条件からは整数たるべき量子数に——半量子数があらわれることの原因でもある。[20]

パウリは、ストーナーの研究と関連して、異常ゼーマン効果を説明するために、形式的に電子に第四の自由度を付与して term〔項〕の数と相当する量子数に関するかぎりイオンのスペクトラムと相当するアトムのそれとの正しい関係を与えた。この第四自由度の意味は当時不明であったが、

これによってラッセル、ソーンダーズ、ハウトスミット、フント、ゾムマーフェルトの一派により複雑なスペクトルの体系化が可能となった。さらにスペクトラムの微細構造のより詳細な検討は、とくにX線の場合において、ゾムマーフェルトの相対〔論〕的補正をまったく不完全なものとして烙印した。いまやボーアの原子構造論の水素原子の場合の成功をほとんど偶然と見るべきではないかとさえ疑われ〔るようになっ〕てきた。

こうした事態に鑑みてボーアは、すでに一九二〇年のある論文のなかで「標準状態で電子が『electric rings』のような特殊の幾何学的単純さをもった軌道上を運動しているという仮定を正当とすることはもはや不可能に見える」ことを認めた。[21] ここではなお、「もっと複雑な運動の可能性を探究する」ことに希望が継がれているが、二年後には「通常の物理的概念は細部にわたる記述に十分な基礎を供しない」から「われわれははっきり定まった物理的像 a well-defined physical picture に基づく現象の叙述に関わるものではない」と言うところまで進んできた。[22]

(1) 本章および次章については、とくに W. Pauli, Quantentheorie, *Handbuch d. Phys.* Bd. XXIII (1926) が優れた批判的著述である。なお実験的事実の一般的叙述ではゾムマーフェルトの *Atombau u. Spektrallinien*, 4 te Aufl. (1924)、理論ではボルンの *Vorlesungen über die Atommechanik* I (1925)（邦訳、原子力学）が参考になる。

(2) Über den Bau der Atome, *Nobelvortrag 1922*, Berlin (1924) もっともこれは単に通俗的説明のみにとどまったのではなく、天体力学の方法はしばしばこの半古典的量子論に利用された。

(3) 因果性の要求を模範的に満足した天体力学に対し、かような力学的記述を与えることは、元素の一定の性質に関する経験、すなわちシャープなスペクトル線の存在とはいかにしても矛盾する（*AT. NB.* S. 69）。

（4）N. Bohr, Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau, I, Die Grundpostulate der Quantentheorie, *ZS. f. Phys.* 13. S. 117 (1923) 英訳は *Proc. Cambridge Phil. Soc. Supplement* (1924)。すでに、一九一八年の On the quantum theory of line spectra (*Det Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter*, 8. Raekke, IV. 1 独訳 Vieweg & Sohn 出版あり）においても、この形式性はあらわれている。

（5）*Ann. d. Phys.* 36, S. 91 (1911) 綜合的には ibid. 51, S. 327 (1916) および *Naturwiss.* Jg. 11, S. 543 (1923). *Proc. Acad. Amsterdam* 16, S. 501 (1914) 具体的な例の計算は J. A. Krutkoff : *Journ. d. Russ. Phys. Chem. Ges.* 50, Phys. Abt. S. 83—171, Berlin (1921) に詳しいという。上記振子の例は A. Sommerfeld, *Atombau u. S.* S. 399 (4. Aufl) にも紹介されている。

（6）N. Bohr, *Über die Quantentheorie der Linienspektren* (1923) S. 9

（7）E. Mach, *Die Mechanik*, 7te Aufl. S. 131

（8）作用量子の不可分性は原子現象の記述に不連続性を導入する。

（9）Bohr, Die Grundpostulate der Quantentheorie *ZS. f. Phys.* 13, S. 129. (1923)

（10）のちに量子力学においてもボーア（*ZS. f. Phys.* 40. S. 167. 1926）はこの原理のアナローゴンを証明したが、量子力学の最も非古典的な部分である変換理論と測定との関連はまさに adiabatisch〔断熱的〕でない突然の plötzlich〔な〕変化において見られる。vgl. W. Pauli, Quantentheorie. *Handbuch d. Phys.* § 11 も参照。

（11）対応原理については、前記ボーアの Grundpostulate のほか、F. Buchwald, *Das Korrespondenzprinzip*, Vieweg & Sohn (1923)、パウリの *Handbuch der Physik*, XXIII, Quantentheorie (1926) 中の叙述、新しいものとしては P. Jordan, *Anschauliche Quantentheorie* にも説明されている。内容から言えば、すでに一九一八年の上述の *On the quantum theory of line spectra* に発表されている。

（12）Grundpostulate, *Z. S. f. Phys.* S. 144. 156

（13）N. Bohr, ibid. S. 142 の脚注。

（14）Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*, S. 51 ff. 275 (1936)

（15）Heisenberg, *Die Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*, S. 78 (1930)

（16）対応原理のこの一面を、哲学的に重要なものとして、田辺元博士が取り上げられたのは正しい解釈と言える。

（17）寺田寅彦博士はボーアの原子論の紹介を聞き、「何だか原子が自分の行先を知っていて、それに相当する波長の光を出すような気がしますがね」と言って長岡教授を苦笑させたという逸話が中谷博士の「冬の華」三一七ページにあ

るが、これはじつはボーアのモデルにとってきわめて辛辣な批評であったと言える。

(18) Pauli, *Handbuch d. Physik* XXIII, S. 49. パウリは「これに何よりも必要なのは、一般に定常状態にある原子中の粒子の一義的に決まった運動についてどの程度まで語りうるかを、より正確に物理的に分析することである」と付け加えている。〔本書一一四ページ参照〕。

(19) Sommerfeld, *Atombau u. S.* (W. E.), S. 206 (1924)

(20) Schrödinger, *Ann. d. Phys.* Bd. 79, 5. 521 〔(1926)〕

(21) Bohr, *The theory of spectra and atomic constitution,* (1922) p. 60

(22) ボーア前掲 (21) 序文。

〔1〕 選集版では「Bohr-Heisenberg は週期系の……」。

§9 過渡期の量子論 II ——光量子論をめぐる論究

ボーアの定常状態とその間に起こる遷移の概念を、輻射と原子との熱平衡に適用し、光量子説の統計的解釈に一歩を進めたのは、またもアインシュタインであった。

アインシュタインは原子系による輻射の吸収・発散の機構になんら特殊な仮定を設けず、単に、一定〔の〕定常状態にある原子数がマクスウェル－ボルツマンの分布則を一般化したものにしたがうということ、および、自然偶発 spontaneous 遷移と誘導された遷移の確率を形式的に考察するだけで、プランクの輻射式を導いた。[1]

この演繹のなかで、単位時間の遷移確率を決定するのに、極限の場合にプランクの式がレイリー－ジーンズの式になり、古典理論と一致するとしているのは、対応原理の精神であり、それに先鞭をつけたものであったが、確率概念で統計的結果としての古典理論と結びつけることは、のちのボーア－クラマース－スレイターの輻射理論にも採用されるところである。

アインシュタインの取扱い方で、輻射過程の生起の「原因」を索めず、単に、この過程が偶然性に基づく確率に支配されているとされたこと、就中、遷移が自然偶発的 spontaneous に起こり、な

んら帰すべき外的刺戟が見出されないという点は、自然の要素的過程には因果性が適用されないのか、それとも理論がまだ不完全でそうした表面的な結果が出るのかという興味ある問題を呈出した。[2] ことに、遷移の起こる時間、遷移過程の継続時間等を決めようとする理論はことごとく失敗に帰したところから見て、それはある瞬間に不連続的に起こり、この物理的出来事 Geschehen の不連続性はわれわれの通常の空間時間の概念に無縁なものであり、それらの概念をもっては遷移過程は物理的に意味のあるような記述ができないのではないかという深刻な批判もあらわれてきた。[3]

アインシュタインは、[2] 輻射による原子の反跳を考察して、エネルギーと並んで運動量〔の〕保存の概念もまた個別的輻射の過程に適用しうることを示して、古典理論の球面波に対立して、一方向きの、完全に方向づけられた輻射線の発射を結論したが、これは原子的過程の描像をますます不可解なものとし、ボーアは、エネルギーおよび運動量の保存は、原子過程の性質についてはなんらの確とした結論を許さず、ただそうした過程の Zustandekommen (occurence)〔生起〕が量子論の要請にしたがっていることとしか知れないと言い、[4] 原子構造問題のすべての進歩は、量子論の「mysteries〔怪異〕」をますます力づける傾きがあると告白している。[5]

このように、光量子論が一歩一歩新しい境地を開拓してゆくにつれて、この理論によって、従来波動論の独壇場とされていた屈折、干渉、回折等の現象を征服しようとする試みが相次いで発表されたのはむしろ当然であった。次にそのいちじるしいものを挙げよう。[6]

E・シュレーディンガーは運動量の保存則を光量子に適用し、他に特殊な仮定を用いず、ドップ

ラー効果——それは波動論の力強い証明の一つと思われていた——を導いて注目をひき、[7] 一九二四年にはL・ブリウアン[8]が最小作用の法則と相対性理論における光の運動量とエネルギーの関係と量子条件とを結合し、ニュートン以来の粒子説の難点であった光の屈折の正しい法則を光量子論的に導くことができた。他方、以前の粒子説で輻射圧が実験値およびマクスウェルの理論の二倍という誤った値に計算されていたのを、相対性理論の助けによって正しい値を得た。

デュアンは、光量子の運動量が回折格子へ伝達されるとして回折や干渉、屈曲等を、その立場から、特定な場合において導き出すことができた。[9]

ところが、A・スメカル（*Wiener Ann.* 1922, Nr. 10, S. 79）が注意したように、「光量子によって伝達されるエネルギーと運動量のみを実在的として古典的波動論に由来する概念を廃棄すると、この光量子の運動は、多数の格子を構成するすべての原子の存在に依存する。これは光量子に対して古典的な質点の運動学を適用することに疑問をいだかしめる」。[10] さらに注意すべきは、これらの場合に特殊相対性理論における運動量＝エネルギー関係や量子条件に含まれた周期性が利用されていることである。これはのちのドゥ・ブロイの波動力学で一般化されるべきものであった。事実、デュアンが対応論的な量子化則を用い、格子によって反射された $|p|=h\nu/c$ という運動量をもつ光量子の方向が、あたかも波長 $\lambda=h/|p|$ に相当する波の方向と等しくなることは、これを物質粒子に移して考えると、まさしくのちのドゥ・ブロイの物質波の波長を得るが、これは対応原理と、それに独立に生まれた波動力学とのあいだの関連を示すものとして大きな意味がある。

M・ブリウアンはすでに一九一九年に、電子の運動とともに発せられる、光とは別な、ある波動

を考え〔*Comptes rendus*, t. 168, p. 1318 (1919)〕、これが周期系の場合にはボーアの原子模型と同等な結果を生じることを示そうと試みた。この波動はのちのドゥ・ブロイのとはまったく異なり、生産的なイデーとは言いがたかったけれども、ドゥ・ブロイが彼の最初の物質波の論文で注意しているのを見ても、その暗示性は無視できない。

これらの研究にあらわれた周期性なるものと、波動との類縁を想うとき、波動力学を経験している今日のわれわれは、ここで朧ろげにボーアの量子条件がなぜ周期系にのみ制限されなければならなかったかの理由に気づかないであろうか。のちに顕かにされた量子論独特の粒子・波動二元性の一面たる波動性が隠蔽されて、粒子性のみが認められていた当時としては、前者を、その不完全な擬装、代用物たる運動の周期性で補うほかはなかったのである。周期性の見出されないところには波動性を捉えることができず、したがって量子条件の適用の手懸りが得られなかった。

これからまた、ボーア原子模型における電子の周回運動がいかに特殊な間に合わせにすぎないかも了解され、非周期系の問題への拡張に波動力学の誕生を待たなければならなかった所以も明らかであろう。

以上に触れたような光量子説の立場からする研究も、なおあまりに個々の場合に限られて、一般的な理論とするわけにいかない。すでにローレンツが提出したパラドックス〔本書五七ページ〕を回顧してみても、極端な光の粒子説が陥る困難は論議の余地がない。また、時間的に変化する電磁場から、静的な場に移ってゆけば、ここでも光量子説の立場はいよいよ困難を加える。ところがマク

スウェルの理論は、反対にこの電磁波と静電磁場とを同一の一般原理から導出するところに特徴があるではないか。

あるいはまた、散乱的な媒質中を光が通過する場合には、光の波長に比して小さい距離では、光量子に一定の軌道を定義することは不可能で、あたかも原子内電子の運動について古典的軌道の概念の困難を指摘されたのと類似した事情があり、結局それらの解決は、来たるべき「量子力学」の課題として残された問題と見るほかはない。

これに対して、光の強度が非常に弱く、個々の光量子が相互に作用しえないような場合でも、古典的波動論の結果は正確に成り立ち、また、非常に速く運動する（たとえばカナール線中の）原子から発する光は、原子の運動方向と直角に細隙〔スリット〕を通じて分光器にかければ、古典理論では線は拡がって見えるはずであるが、光量子論からすれば、そのような現象は起こらぬことになる。このアインシュタインの考察をそのまま実験的に検証したA・ルップは、古典的波動論の正しいことを見出した[11]。

輻射の量子論の困難に鑑みて、それを古典的波動論と調和しようとしたスレイターの試みを追究して、ボーアークラマースースレイターは、光量子論の根拠になったような現象の、古典的波動論からの偏れを、仮想的 virtuell な場の作用に帰し、不連続的な遷移過程は、原子の連続的な球面波の発射に随伴する統計的現象として説明しようとした（一九二四年）[12]が、これがために、「エネルギーおよび運動量〔の〕保存則は単に統計的にのみ成立し、要素的個別過程では必ずしもしからず」

とする大胆な叙説を採用することになった。原子的過程ではエネルギー保存則も厳密な自然法則ではなく、エントロピー則と同様に統計法則にすぎないという想定は、必ずしも創見ではないが[13]、学界の大きな問題となったのはここにおいてであった。

ところが、このことは必然の帰結として個別的要素過程の因果的統制を否定し、それは孤立系のエネルギーが時とともに大きな動揺 Schwankung をこうむることを認めるので、統計的熱理論の一般的基礎とも矛盾をきたすことになる。もちろんこの結果が目立つまでには、非常に時間を要するので、経験に直接矛盾するとは言えないが、経験が強制することなくして、統計的熱理論のような一般的理論と矛盾する仮説を採用するのは早計と考えられる。これを許すためには、シュレーディンガーも言うように、「永遠の相のもとに」おける世界の出来事の安定性はすべて個々の系が残りの全世界と連関しているから成立すると考えるほかなく、世界の他の部分と切り離された孤立系は、この連関を統制原理とせずしては、カオスとなること、社会的・倫理的・文化的現象と類似性があるというべきであろうか[14]。

ボーアークラマースースレイターの説のしばらく以前に、アメリカの一流の実験物理学者A・H・コンプトンは、物質と輻射の交互作用の最も単純な現象、すなわちX線と自由電子の衝突に関するいわゆるコンプトン効果を発見した[15]。この現象は、電子に衝突してX線が散乱された方向と、この衝突のために減じた振動数とのあいだに一定の関係が成り立つことを示したもので、その量的関係はコンプトンおよびデバイが示したように、光量子の概念によって見事に説明され、あわせて[3]

光量子と物質のあいだに運動量保存則が成り立つことも直接確かめられたわけである。古典的波動論からすると、電子は投射された輻射と同じ振動数で共鳴振動し、そのままの散乱線があらわれるはずなので、これはきわめて有力な光量子説の根拠となる発見で、たとえばゾムマーフェルトのごとき〔は〕、それまでは、波動論と光量子論の妥協的な立場に満足していたが、このコンプトン効果を知って以来、そのような妥協を拒けるようになったと告白しているほどである。(16)

この現象がボーア-クラマース-スレイター説に困難をきたすことは想像にかたくない。実際、この説の立場からは、二次球面波の光波の位置や速度ははなはだ曖昧となる。それればかりか、まさにこのコンプトン効果に関連した実験的研究がボーア-クラマース-スレイター説に致命的な experimentum crusis〔決定的試錬〕となったのである。(17) すなわちコンプトン-サイモンは、ウィルソン霧函の立体写真によって、一次の反跳電子と散乱線であばき出された二次電子との起点と方向とを験することにより、両者が直接の因果関係にあって、保存則の適用による計算と一致する結果を確かめた。(18) また、ガイガー-ボーテはシュピッツェン計数管を用い、ボーア-クラマース-スレイター説では〔考えられ〕ないはずの、反跳電子と散乱線とのあいだの時間的連関 Kopplung が〔実際には〕あることを見出した。(19) この二種の実験は、光量子の物理的意義を確認し、エネルギーおよび運動量保存則が要素過程において個別的に成立することを示すもので、きわめて重要な理論的意義をもつ実験と言うべきで、のちの量子力学の体系に対しても基本的な役割を演じている。かくしてボーア-クラマース-スレイター説は間もなくついえ去ったが、この理論的提案は当時の量子論の Situation〔状況〕の闡明に、きわめて重要な役割を果たしたものと言える。ハイゼンベルクも言う

ごとく、[4]この時代の概観はパウリのハントブフが「ほとんど一言も変える必要のないほど」詳細に与えているが、その真の物理的意味は、量子力学が出来てからわかったと言えよう。

十数年後、シャンクランドはコンプトン－サイモンの実験をくつがえす実験、すなわち、方向的関連を否定する結果を発表し〔*Phys. Rev.*, 49, p. 8 (1936)〕、量子力学の権威たるディラックがそれを紹介して、ボーア－クラマース－スレイターの説の復活を説いたため、学界の論議の的となったが、間もなくシャンクランドの実験に不備が見出されて、ふたたびコンプトンらの結果が確証されたが、これらの実験の技術はけっして容易ではない。

なお、上述A・ルップはその後、電子の波動性を実験的に研究して、ますます盛名を博したが、さらに電子の polarisation〔分極〕や陽電子に関する実験結果を発表するころから精神に異常をきたし、学界に大きな影響を及ぼしたこの発表が虚構を交えたものと疑われる結果となったのは、近年珍しい不幸な出来事であった。

以上、幾多の問題から観取されるように、本質的に量子的な過程では、空間座標・時間座標をもってする記述法が困難であることがしだいに明白となってきた。ボーアが、[5]「原子的な衝突の継続時間が原子の固有振動の周期より短いときには、空間時間的記述は原子安定性と矛盾せざるをえない」ことを説き、[20]パウリが、対応原理を一般化し量的にするためには「そもそも定常状態における原子内の粒子の一義的に決定された運動をどの程度まで一般に言いうるかを、物理的に正確に分析

することがまず必要であろう」と注意したのは、いずれも同じ傾向を説くものであった。

しかし、具体的にいかにすべきかに行き悩んでいたこの方向に、積極的な一歩を進めて、微かながら光明をもたらしたのは、H・A・クラマースが光の分散の公式の導来に用いた論法であった。彼は、以前ラーデンブルクが、振動体による光の散乱にアインシュタインの遷移確率のイデーを適用したのを一般化し、電磁的系へ光波が当り分散される作用を、対応原理にしたがい、まず古典理論から出る二次光波の振幅から出発し、これを大きな量子数の場合にのみ極限式として量子論的に転釈し、これから、すべての量子数について成り立つ式を得るために、古典論のエネルギーの微分 Differentiel にかえるに定常状態のエネルギーの定差 Differenzen をもってし、実験上のスペクトル線の振動数と正確に一致する結果を導くことができた。その特長は「この式が、スペクトルおよび原子構造の根本要請に基づいて直接的物理的に解釈されるような量のみを含み、なんら多重周期系の数学的理論の痕跡をとどめない」点にある。この際、クラマースは virtual osoillator〔仮想的な振動子〕の概念を導入して、G・ブライトの批評をこうむったが、彼も弁ずるとおり、これは対応原理にしたがい、模型を排した単なる振動を対応させただけで、なんら仮想的な模型を導入したものではない。

つづいて、一九二五年の初めクラマース－ハイゼンベルクは「原子による輻射線の散乱について[21]」の研究で、上述のクラマースの研究を一般化し、厳密にしたが[22]、ここでも「スペクトル線の出現は弾性的に振動する電子の存在と結びつくのではなく、一つの定常状態から他のそれへの遷移である」ことに力点をおき、原子中の粒子の周回振動および或る程度までこれら粒子の定常状態にお

ける一定の軌道の表象に物理的実在性一般を拒否し、徹頭徹尾、形式的対応の方法によって、微分的古典論が定差的量子論へ転釈された。[23] パウリも評したように「ここでわれわれは原子物理学のきわめて重大な意義ある発展の出発点に立つ」ことになった〔注(10)八八ページ〕。

クラマース－ハイゼンベルクの結果は、事実その極限の場合において、しばらくのちに同じく分散論から見出されたトマス－クーンの和の規則 Summenregel と併せれば、量子力学の交換関係を包含するものである。また、入射線の振動数 $\nu_0 \to \infty$ または $\to 0$ にしたがい、光量子的にも静電場的にもこの式はまさしく量子飛躍と断熱的な準静的外部作用との深い間隙を架橋することさえできるのである。ただし、これは後日の解釈である。[24]

この新たな建設の端緒となったクラマースおよびハイゼンベルクの研究は、ボーアを中心とする一つの学派を形成したコペンハーゲンの理論物理学の Institute〔研究所〕でおこなわれたものであるが、同じころ、ゲッティンゲンのボルン、ヨルダンらもハイゼンベルクの帰来と相俟って、同様の思想を表明した。

ボルン－ヨルダンは量子論を非周期系へ拡張しようとする一つの試みにおいて、[25]「真の自然法則は原理上観測しえられ、確定しえられる量のみを含む」ということを、「対応的考察の一般的原則」として先頭に立てたが、彼らが例示するところによれば、「相対性理論は、異なる場所に起こりつつある二つの事象の絶対的同時性を確定することが[5]原理上不可能であることをアインシュタインが認識したことから誕生した」。

この原則を光学的問題へ応用すれば、ある原子と他の原子中の電子の運動の位相差は、原理上、

確定できない量である。そこで古典光学の法則も、電子運動の位相から独立な、すなわち位相についての平均でなお保存されるような関係だけが、大きな量子数の限界で、量子論に採用されるのである。そこでこの位相の平均から得られた古典的公式を量子論的に確率法則へ転釈することが問題となってきた。同じ思想は、このころ出版されたボルンの著書『原子力学に関する講義』でも主張され、折衷的な半古典的量子論の欠陥は十分自覚されている。

翻(ひるが)えって考えるに、ひとたび位相を拒けるならば、連続的な空間座標をもって電子の運動を記述することも、当然廃棄されねばならない。だが、連続的な空間座標は、従来の物理的量の計算法則と分離しがたく結びついている。この根底から変革を敢行して初めてボーア原子論が所有していた二元的・折衷的性格が克服されるであろう。かくてこの思想を量的に精密化するとともに、従来の断片的な対応的研究を統一する、新しい量子力学待望の声はしだいに高まってきた。

(1) Jordan, Die Lichtquantenhypothese (*Ergebnisse d. exakt. Naturrwiss.* Bd. XII) (1928), *Verh. d. D. Phys. Ges.* S. 318 (1916), Einstein, Zur Quantentheorie der Strahlung, *Mitt. Phys. Ges. Zürich*, Nr. 18 (1916); *Phys. Zeitschr.* Bd. 18, S. 121 (1917)〔一般的な場合をディラックが量子力学以前に取り扱った *Proc. Roy. Soc.* vol. 106, p. 581 (1924)。

(2) マクスウェル－ローレンツの方程式は単に量子的過程の生起する頻度を表わすのみで、物質の要素的変化は spontaneous であろうという考えや、光量子ないし Lichtknoten は超光速度で伝播する「Führer」に導かれるという思想もすでにアインシュタインの抱いていたところであった。

(3) われわれはW・ショットキーの論文 Das Kausalproblem der Quantentheorie als eine Grundfrage der modernen Naturforschung, *Naturwiss.* 9, S. 492. 506 (1921) をきわめて示唆に富んだ論文として推奨せねばならぬ。彼はここで、測定観測のできない補助概念も物理学に必要なこともあるが、経験と矛盾した場合には、ただちにそれを諦める用意が必要であると、のちのハイゼンベルクの態度を予言し、従来の形での因果律は疑問であると

し、さらに量子仮説は場と交互作用にある物質の不連続的〔な〕Verhalten〔ふるまい〕〔を？〕空間的にも時間的にも限定しないと述べている。なお Pauli. *QT.* S. 11—12 参照。

(4) Bohr, Grundpostulate der Quantentheorie, S. 163—164

(5) Bohr. *TS. AC.* VII

(6) O. D. Chwolson, *Die Physik* 1914—1926, SS. 383—399 に多数の例がある。

(7) E. Schrödinger, *Phys. Zeitschn.* 23. 301 (1922) なお Sommerfeld, *Atombau u. S.* (W.E.), S. 52 ff (1924) 参照。

(8) *C. R.* 178, p. 1696 (1924)

(9) W. Duane, *Proc. Nat. Acad. Amer.* vol. 9, p. 159 (1923) これと類似の試みは、A. H. Compton, *Proc. Nat. Acad. Amer.* vol. 9, p. 359 (1923), P. S. Epstein & P. Ehrenfest, ibid. vol. 10, p. 133 (1924) にも見られる。

(10) Pauli, *Quantentheorie*, S. 81—83 (1926)

(11) A. Einstein, *Sitzungsber, d. Preuss. Akad.* S. 334 (1926), A. Rupp, ibid. S. 341 (1926) のちにボーアが明らかにしたところでは、アインシュタインの推論はドップラー効果と細隙での散乱を考えないところに欠陥があった。光量子論からでも理解される。

(12) N. Bohr, H. A. Kramers, J. C. Slater, *ZS. f. Phys.* 24, S. 69 (1924). *Phil. Mag.* 〔47, p. 785 (1924)〕

(13) たとえば、これより以前C・G・ダーウィンは、分散現象を量子的に説明するため、個別的原子過程におけるエネルギー則を棄てて、種々の仮定を加えて、ともかく、古典的分散理論との統計的一致を導いたが、それは経験に一致しない仮定を含むことをスメカルやボーアが指摘した。C. G. Darwin, *Nature* 110, p. 840 (1922), 111, p. 771 (1923). *Proc. Nat. Acad. Amer.* 9, p. 25 (1923)

(14) Schrödinger, *Naturwiss.* 12, S. 720 (1924)

(15) A. H. Comptom, *Bull. Nat. Res. Counc.* Nr. 20, p. 10 (1922); *Phys. Rev.* vol. 21, p. 483, (1923) 直角方向に散乱された場合の波長変化 $\Delta\lambda=\frac{h}{m_0 c}=0.024\text{Å}$ はコンプトン波長と呼ばれ、普遍常数の組合せからできているので、重要な概念と見られる。

(16) Sommerfeld, *Atombau u. S.* S. 338 (1924)

(17) フィゾーの実験がニュートンの光の粒子説を廃し波動論を確証した experimentum crusis の例として有名なのと対照して興味がある。

(18) Compton, Simon. *Phys. Rev.* vol. 26, p. 289 (1925)

(19) *ZS. f. Phys.* Bd. 32, S. 639 (1925) なお *Handbuch. d. Phys.* Bd. XXIII, S. 423 参照。また、当時の初等的理論でなく、相対論的な波動場の量子論でも時間的一致は証明される。

(20) Bohr, *ZS. f. Phys.* 34, S. 142 (1925) の Nachschrift, *Naturwiss.* 14, S. 4 (1926) *AT. NB.*

(21) Kramers, Heisenberg, *ZS. f. Phys.* Bd. 31. S. 681 (1925)

(22) それは当時スメカルによって可能性を指摘され、のちにインドのラマンが発見した inkohärent な〔コヒーレントでない〕散乱線の理論を含むものであった。

(23) これは、つづいて現われたハイゼンベルクの量子力学の出発点として取り上げられているので、とくに重要である。

(24) Pauli, Zur Quantentheorie aperiodischer Vorgängen. *ZS. f. Phys.* Bd. 33, S. 479 とくに § 7. SS. 493—4

(25) Jordan, *A. QT. Kap.* Ⅱ, § 3

〔1〕 選集版では「……理論が未だ不完全で……」。

〔2〕 選集版では「これは Einstein が、輻射による……」。

〔3〕 選集版では「併して光量子と」。

〔4〕 W. Heisenberg, *Naturwiss.*, 17, S. 490 (1929)

〔5〕 選集版では「Bohr は、……」。

〔6〕 選集版では「……確定することは、原理上……」。

§ 10 量子力学の発端

待望された新しい量子力学建設の希望を一般的・具体的に実現したのは、若いドイツの理論物理学者ヴェルナー・ハイゼンベルク Werner Heisenberg（一九〇一 12/5 ー ）であった。

ハイゼンベルクは有名な古典言語学者を父として生まれ、ミュンヒェン、ゲッティンゲンで[1]ゾムマーフェルト、ボルンに学んだ。彼が当時の半古典的な量子論の立場からヘリウム原子の問題を苦心して計算して直観的モデルの矛盾をつぶさに体験したことは、すでに述べたことである〔本書一〇三ページ〕。コペンハーゲンのボーアのもとでは、前記クラマースとの共同研究等によってすでに新進学者として理論物理学の第一線にあったが、一九二五年の春、彼は流行病を避けてヘリゴランド島に滞在中、新しい着想を得た。かつてアイザック・ニュートンはケンブリッジの学生時代、疾病の流行のためウールスロウプの郷里に帰り、万有引力の法則に想到したと伝えられるが、ハイゼンベルクの場合にはニュートンの古典力学を根本的に克服する量子力学が誕生した。彼は当時ハンブルクにいたW・パウリのもとに立ち寄ってその賛成を得、ここに画期的な論文「運動学的および力学的諸関係の量子論的転釈について[1]」を発表することになった。

ハイゼンベルクはこの論文の冒頭で、学界に論議をまき起こした有名な方法的考察を試みた。この考察は、のちにしばしば哲学的論争の主題となったから、歪曲や誇張を混えた解釈を避けるため、いささか長文ではあるが以下に訳出しよう。

「周知のように、一般に量子論で観測しうる量（たとえば水素原子のエネルギー）の計算に用いられる形式的規則に対しては重大な非難を加えることができる。すなわちその計算規則は、一見して、原理的に観測しえない量のあいだの関係を本質的な構成部分として含んでおり、したがって従来観測しえなかった量ものちには多分実験的に近づきうるようになるであろうという希望を人がいつまでも固執しないかぎり、その規則がまったく直観的・物理的な基礎を欠くことは明らかである。そうした希望は、もし上述の諸規則が首尾一貫して量子論的問題のはっきり限界された領域へ適用できるならば、根拠があると見なすこともできよう。しかし、経験の示すところによれば、単に水素原子とこの原子のシュタルク効果が量子論の形式的規則にしたがうのみで、すでに『交叉場』（水素原子が方向を異にする電場と磁場とのなかにある場合）の問題では根本的な困難があらわれ、周期的に変ずる場への原子の反作用は、上述の規則では、たしかに記述できない。さらに量子則を多電子原子の取扱いへ拡張することは不可能なことが証明された。かような、じつは主として古典力学の応用を特徴とする量子則が成り立たないことを、古典力学からの偏倚として言い表わすの



W. ハイゼンベルク

が慣しとなった。しかしこの言い表わし方は、すでに（まさにまったく一般に成り立つ）アインシュタイン－ボーアの振動数条件が古典力学との、あるいはむしろ、波動論の立場から言ってこの力学の基礎に横たわる運動学との完全な訣別を示し、きわめて簡単な量子論的問題においても古典力学の妥当性はまったく考えられないことを思えば、とうてい適切なものとは見なしがたいであろう。[2] かかる事態に際しては、従来観測しえなかった（電子の位置、周回時間のような）量を観測するという希望をまったく諦め、そこで同時に、上述の量子則が経験と部分的に一致することは多かれ少なかれ偶然的であることを承認し、古典力学にアナローグな観測しうる量のみがあらわれるような量子論的力学の建設を試みるのが良策と考えられる。……[3]」

そこで「量子力学のプログラム」は一般に「原理的に験証不可能な直観性をひとまずまったく諦めて、そのかわり、直接実験的に確かめうるから内的矛盾の危険がほとんどない具体的な諸関係のみを含む」新理論の建設にある。[4]

しかし、前期量子論の対応原理から $n, n-\alpha$ なる定常状態の間の遷移によって $\nu_{n\,n-\alpha}$ なる振動数の光の振幅 q_r (J) において、作用変数 J を量子条件にしたがって h の整数倍に等しくおく際、この整数を $n, n-\alpha$ のいずれにとるべきかに拠りどころがないことはすでに述べた。これは対応原理の精神で遂行される。

「この諦めが、粒子の実在性を論議する際の最初の決定的な制限を意味する。[4]」

「古典理論では、電子の運動にともなう輻射の高次の項は、その運動のフーリエ表現が与えられればただちに計算されるが、量子論でもこれに対応した事情が期待される[5]」。そこで「この問題は電

磁力学にはなんらかかわりなく、純粋に**運動学的**性質のもの」である点がとくに重要であると彼は考えた。法則の形の変更ではなくして、**量子論的**な量の計算規則の問題である。「たとえば、古典的な量 $x(t)$ のかわりになる量子論的な量が与えられたとすれば、$x(t)^2$ のかわりにはいかなる量子論的な量があらわれるか？ というようなことが問題なのである。」ここに、先行する研究から超え出た統一的な理論としての量子力学建設の巨大な一歩がある。

この量子論的量の計算規則の手懸りを獲るためには、まず確実な実験的事実に根拠を求めねばならぬ。「量子論では、電子に空間内の一点を時間の函数として観測可能な量によって対応させることは不可能である。」すなわち、前期量子論のフーリエ級数 $q(t)=\sum q_\tau e^{2\pi i\nu\tau t}$ のごとき表わし方は許されない。ここに運動を表示するために新しい量子力学的量が要求される。「しかし、電子に輻射線の発射を対応させることはできるであろう」。輻射線はまず振動数によって記述され、古典論における微分形の

$$\nu(n,\alpha)=\alpha\cdot\nu(n)=\alpha\frac{dW}{dJ}=\alpha\frac{1}{h}\frac{dW}{dn}$$

に対応して、（すでにクラマースとの共同研究においておこなわれたごとく）定差形の振動数条件

$$\nu(n,n-\alpha)=\frac{1}{h}\left\{W(n)-W(n-\alpha)\right\}$$

のごとく二つの変数 n, $n-\alpha$ の函数として表現される。これこそ量子論にとってきわめて基本的で、かつ正確に検証されている経験的事実である。振動数について古典論と量子論との比較に特徴

的なものとしてリュドベリーリッツの結合関係を書き上げて見ると

古典論的：$\nu(n, \alpha)+\nu(n, \beta)=\nu(n, \alpha+\beta)$

量子論的：$\nu(n, n-\alpha)+\nu(n-\alpha, n-\alpha-\beta)=\nu(n, n-\alpha-\beta)$

ないし $\nu(n-\beta, n-\alpha-\beta)+\nu(n, n-\beta)=\nu(n, n-\alpha-\beta)$

となる。量子論的には量子数は単なる記号として、相互に区別するために役立つだけで、これについて〔加減その他の〕計算をするものではなく、尺度 Massbestimmung をそのなかに含まない(6)。

第二に振動数以外に輻射の記述に必要なものは振幅である。振幅は複素ベクトルとして

古典論的：$\mathrm{Re}\{\mathfrak{A}_\alpha(n)e^{i\omega(n)\alpha t}\}$

量子論的：$\mathrm{Re}\{\mathfrak{A}(n, n-\alpha)e^{i\omega(n, n-\alpha)t}\}$

で、後者における n, $n-\alpha$ の対称性はここでも明らかである。これこそ、原子系の記述が、ある古典的軌道の運動のごときものではなく、観測されうる光の発射、すなわち二状態 n, $n-\alpha$ 間の過程に注目することの一つの表現である。

いま古典論において、運動を記述する量たる $x(t)$ を考えると、これは $\mathfrak{A}_\alpha(n)e^{i\omega(n)\alpha\cdot t}$ の形の量をすべての α について和ないし積分することで表わされた。ところが量子論の立場からは、n, $n-\alpha$ が同等の意味のものであるから一方についての和や積分は無理で、ただ $\mathfrak{A}(n,n-\alpha)e^{i\omega(n,n-\alpha)t}$ の形の**量の総体**で $x(t)$ が**代表**されると考えるべきである。そこでこれを合成した $x(t)^2$ 等がどう

なるかは古典論と同様の対照で導けるが、この場合、個々の$\mathfrak{A}$の位相は合成された結果にもあらわれてくるが、それも古典論とのアナロジーで幾何学的に解釈することは不可能といわねばならない。「重大な困難は、古典論では $x(t)\ y(t)$ は $y(t)\ x(t)$ につねに等しいが、量子論では必ずしも然らぬ点に存する。すなわち、乗法の交換法則が成立しない場合がある。ここにこれらの新しい量の計算法則が要求される。」

ハイゼンベルクは、これから簡単な力学的問題に進んで、まず前期量子論の「量子条件」$\oint pdq = J = nh$ を取り上げ、従来このように位相積分をhの整数倍としたのは、対応原理の立場から見ても恣意的なものであり、じつはJそのものには付加常数があって差支えなく、$(n+1)$ 番目とn番目のJの差がhならば十分である。すなわち $\frac{d}{dn}(nh) = \frac{d}{dn}\oint m\dot{x}^2 dt$ を、クラマースとの前研究でおこなったように定差形へ書き換えて、当時発見されたばかりのトマス、クーンの分散に関する式を導いた。これがのちに量子力学の基礎たる交換関係の特殊の場合となるものである。(つぎに述べるボルン－ヨルダンのマトリックス(ママ、以下同じ)力学でもまったく同じ方法で交換条件を導いている。)

ハイゼンベルクは、できるだけアナローグに量子論的な力学を建設するために、運動方程式 $\ddot{x} + f(x) = 0$ もそのままの形で取り入れ、ただ「原理上観測可能な確実な地盤から離れないために」、$\ddot{x}$ や $f(x)$ のかわりに、前述のごとく構成された「量子論的な表示 quantentheoretische Repräsentanten を置けばよい」と考えた。「しかし、一般の場合にこの方程式を解くということは、無限に多くの未知数を有する無限に多くの方程式を解くことになるので」、実際にそれを遂行するのは特殊の場合のほかは数学的に困難である。そこでハイゼンベルクは、比較的簡単な非調和振動子や回転子の

問題を解いて、従来謎とされた半量子数が当然導かれること、また、経験的に見出されていた強度関係が演繹されることを示して彼の方法の正しいことを立証した。

かくて、このハイゼンベルクの論文は、その表題も示すとおり、古典的関係から、原理的に観測可能な量子論的アナローゴンへの書き換え transcription として、まさにボーアも評したように「対応原理の内容の精密化」であり、その適用方法の統一化であって、量子論の歴史における画期的な業績として記憶さるべきものである。これを契機として建設された量子力学のために隅の首石を置いたものと言えるであろう。

この方法論が捲き起こした哲学上の論争については間もなく詳述することにする。

ハイゼンベルクの論文は輝かしい展望を拓(ひら)いた、いわゆる bahnbrechend〔破天荒〕な業績であったが、いまだ量子力学の体系を建設したものとは言いがたく、それがためにはハイゼンベルク自身が論文の末尾で述べたように、この方法の深刻な数学的研究にまたねばならなかった。

この体系建設の要求に最初に応えたのはM・ボルン－P・ヨルダンのマトリックスによる量子力学であった。彼らは、ゲッティンゲン大学でハイゼンベルクの同僚としてその研究をすでに status nascendi〔生まれたばかりの状態〕において知っていたから、ハイゼンベルクではまだ初歩的段階にあった形式的・数学的方面の研究をただちに進めることができた。

ボルン－ヨルダンは、ハイゼンベルクの考察の数学的基礎を量子論的な量の乗法の規則にありと見た。ハイゼンベルクはこれを巧妙な対応的な考察から導いたのであるが、ボルン－ヨルダンの数

学的建設は、この乗法の規則がじつは数学者によく知られている**マトリックスの乗法の規則**にほかならぬことに注目することに基づくものである。すなわち、古典理論で時間の函数として与えられた物理的量の量子論的表示となるのは、二つの方向に（不連続的また連続的な値をとるインデックスをもつ）要素を配列した図式たるいわゆるマトリックスである。「新たな量子力学の数学的方法は、通常の数の解析に代えるにマトリックス解析を利用する点に特徴がある。」

マトリックスの理論はすでに前世紀の半ばころのケイレイ（一八二一—九五）の研究に溯り、無限個の要素を有する正方マトリックスはとくにエルミート（一八二二—一九〇一）によって発展せしめられたものであるが、ここに予期されなかった新しい物理学的応用、しかも基本的な応用を見出したのは、あたかも一般相対性理論にリーマン幾何学が採用されたごとく、物理学と純粋数学とのあいだの奇しき関係を物語るものである。しかし、われわれはこの問題はのちに論究することにする。[7]

ボルン－ヨルダンはかようにマトリックスの理論によって量子論的量の演算規則を定義するとともに、変分原理から、一般的なハミルトン函数に対して、古典力学のカノニックな方程式と対応するマトリックスでの運動方程式

$$\dot{q}=\frac{\partial H}{\partial p},\quad \dot{p}=-\frac{\partial H}{\partial q}$$

を導き、さらにハイゼンベルクの方法にならって量子条件に対応するものとして verschärfte Quantenbedingung

$$pq-qp=\frac{h}{2\pi i}1$$

を導いたが、これはのちに基準的交換関係 die kanonische Vertauschungsrelation と呼ばれた量子力学の基礎的関係の原形である。これからエネルギー保存則およびハイゼンベルクでは推測にとどまっていたボーアの振動数条件を証明することができ、エネルギーマトリックス H の対角線要素 H_{nn} が n 番目の定常状態のエネルギーと解されるとともに、輻射線の強度は定常状態間の遷移の確率によって規定されるものとして、座標マトリックス要素 $q(n, m)$ の平方から得られ、物理的量を代表するマトリックスに課せられたエルミート性は、二状態間の遷移の対称性を帰結する。さらに、のちには、エネルギー以外の他の力学的量のマトリックスの対角線要素はこの力学的量の時間的平均値の意味を有することも明らかとなり、しだいに物理的意義が展開されてきた。

かように量子論的量を代表するものとしてマトリックスを導入することにより、古典力学と密接に対応し、それに劣らぬ統一性と完結性をもつ量子力学の体系が、原理的に観測可能な量のあいだの関係をもって樹立されたのである。この理論の著しい特徴は、量子論の諸要請が自動的に満足される点にある。ここでは連続スペクトルも輝線スペクトルも同等の権利をもって表われ、「量子化された」運動と「量子化されぬ」運動という前期量子論の区別は意味を失い、多数の可能な運動から特定のものを選り分けるという意味での量子条件は問題でなく、初めから explizit〔あらわ〕に量子数を用いることは恣意的として拒けられ、量子力学的基礎方程式がそれらの諸条件にとってかわるのである。

ボルン－ヨルダンの最初の論文では、新しいマトリックス力学と対応原理との関連については特別に論じられていない。むしろ、新理論を対応的にではなく、それとは独立な一つの演繹的体系として建設することが主題であった。

さて、対角線マトリックス $H(q, p)$ の要素は系の定常状態のエネルギーを与えるが、$H(q, p)$ が対角線的でない場合には、これを対角線マトリックスへ変換せねばならぬ。ボルン－ヨルダンの最初の論文では「これは困難な問題ではあるが、新理論のより深い連関を究めるに不可欠なこと」が予示せられている。ついでハイゼンベルクの協力をまって発表された第二論文では、適当な変換 $(q^0, p^0)\to(q, p)$ によって、交換関係を満足しつつ $H(q, p)$ を対角線マトリックスにする問題が提示され、摂動論の例で展開されている。すなわちこの変換は適当なウニテール〔ユニタリー〕・マトリックスSを見出して

$$q_n=S^{-1}q_n^0S,\quad p_n=S^{-1}p_n^0S$$

なる変換により、$H(p, q)$ を $S^{-1}H(p^0, q^0)S=W$ なる対角線マトリックスにするものである。しかるに、これはすでにヒルベルトらによって論究されていたエルミート形式の固有値理論におけるエルミート・マトリックスHの主軸変換 Hauptachsen-Transformation の問題であり、古典力学におけるハミルトン－ヤコビの偏微分方程式に対応するものであり、Sは作用函数に相当するものと考えられる。

これによって、系のエネルギー・マトリックスを対角線的にすることがマトリックス力学の中心課題となったのである。いな、これは、ディラックおよびヨルダンの手により変換理論として一般

化され、量子力学の立場の重要な物理的意義を獲得し、さらには深刻な洞察へも導くものであるが、これについては後節〔§13〕に再論することにする。

かくして、「むしろこの理論そのものがボーアの対応原理の精確な定式化[8]と見るべきもの」であり、「今後の理論の発展には、この対応の様式をより精確に研究し、記号的量子幾何学から直観的古典幾何学への移行を記述することが重要な課題である」[9]と説かれた。理論から演繹された結果が、実験の結果と符合するという点を越えて、抽象的な新しい演算法の物理的根拠の把握が要求されてきた。まず諦められていた直観性は、批判的な形で生まれなければならない。

このころ、彗星的にあらわれてロイヤル・ソサエティの報告に「量子力学の根本方程式」[10]その他の論文を発表して、その形式的な美しさで学界を嘆賞させたのは英国のディラックであった。

ポール・アドリアン・モーリス・ディラック Paul Adrien Maurice Dirac（一九〇二—）は、最初ブリストルの大学で電気工学を修めたが、適当な職を得られず、理論物理に転向してケンブリッジのR・H・ファウラー教授のもとで研究していた。天才的な考え方は、ハイゼンベルクの理詰めな論法とは型を異にし、何人(なんぴと)をも首肯させるというわけにはいかないが、それだけに常人の思いいたらない着眼点をとらえるいちじるしい個性をもっている。

彼は、ハイゼンベルクの新しい学説は「古典力学の方程式」の誤り〔を〕で〔は〕なく、これから物理的結果を演繹する数学的操作〔に〕[2]修正を要することを暗示するものと考え、ハイゼンベルクの対応的方法を考察しつつ、まずその数学的操作を体系化した、力学的量のまったく記号的〔な〕代表である量子代数 quantum algebra を構成し、量子論的演算操作が古典論の操作と乗法の交換法則

commutation law を除くほかはほとんどまったく対応して、$h=0$なる不条理を生じない点に重点をおいて、古典理論のポワッソン括弧表示に相当して量子条件を立てたが、彼に言わしめれば、$h\to 0$なる極限での古典理論との一致のごときは重要ではない。この辺にも彼の形式的整合への特異な見方が現われている。

この量子代数こそは、マトリックス力学およびのちに現われた波動力学の担う座標系の特殊性を止揚して、両者に共通な、両者を包括する使命を有したのであるが、これについてはのちに述べることにする。

ディラックは第二の論文では、「量子力学系の記述に用いられる変数が乗法の交換法則を満足しないことは、それが通常の意味の数（c-number と呼ぶ）でなくq-number と〔で〕も呼ぶべきもの、これは乗法の交換法則を除く代数的操作を満足するというだけで、大小もなく、さしあたってなんらの描像 picture も形作ることができない量〔だから〕である」〔とした〕。「しかし、この抽象



P.A.M. ディラック

的な形式は実験によって検証される結果を演繹する手段たるにすぎないので、その意味をこれ以上詳しく問う必要はない」というのがディラックの見解である。ディラックがこれらの論文で水素原子のエネルギー準位の計算、異常ゼーマン効果、コンプトン効果等へ新しいこの理論の応用を試みたことはここに詳説することを要しない。彼ディラックが言うところの symbolic method がハイ

ゼンベルクらのマトリックス力学やのちに述べるシュレーディンガーの波動力学に対して有する意味については改めて述べることにしよう。

ハイゼンベルクが彼の画期的論文の冒頭で、模型的表象に基づく原理上観測しえない量を拒けて新しい量子力学の建設を企て、それが見事に成功したことは、広く学界に物理学の方法論に関する論議をまき起こす結果となった。

独墺物理学界の伝統として、科学の認識論的問題に関連してすでに古典化した学説として多くの場合に取り上げられるのは、カントの先験主義かマッハの実証主義かである。いまこの対立はどの程度まで真の対立であるか、また一般の理解するところははたしてカントなりマッハなりの真意をとらえているかというような問題はしばらく措き、ハイゼンベルクの方法論は、多くの批評家によって、マッハ哲学の流れを汲むものと解釈された。ハイゼンベルク自身の書いたものでは自らマッハ主義であると言明したものは知らないが、またそれを否定もしていないようである。

事実エルンスト・マッハは、かつて六十余年もまえに、次のごとく述べて内容的にもハイゼンベルクの場合を可能なものとして予見していたかに見える。(もちろん、原子論に対する彼の否定的態度は度外視せねばならぬ。)

「なおいまだ原子論的理論にとらわれていた自分は、気体の線スペクトルを気体分子の原子成分相互間の振動によって説明しようと試みた。ここで遭遇した困難によって、一八六三年、自分は次の思想を想到した。すなわち、非感覚的事物は必ずしもわれわれ三次元の感覚的空間に表象されねばならぬことはないと。」「われわれの幾何学はつねに感覚的経験の客体に関係する。しかし、われわ

れが原子や分子のごとき、その性質上**感官に達しえない**単なる思考上の事物 blosse Gedankendingen を用いるやいなや、それらを必然的にわれわれの感覚的経験のユークリッド的な三次元空間に属する関係、相対的位置において考える**なんらの**権利もない。これは原子論的考察を不可欠とする者のとくに考察すべきことである」[11]。

マッハはここでは、種々の次元の空間を利用する可能性を述べているので、のちに述べるΨ函数の高次座標空間でも想起しないかぎり、ハイゼンベルクの観測可能な量への限定とは行き方を異にするが、マッハの本来の立場から言えば、この後者こそ近いものである。実際、ハイゼンベルクの方法を「実証的」として特徴づけることは差支えないし、彼がのちに「Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben[12]（物理学は知覚の関連のみを形式的に記述すべきである）」というような言葉まで吐いているのを見れば[13]、彼の初期の見地がマッハ哲学と評せられるのも無理はない。これは、マッハ主義的色彩の濃厚なR・v・ミーゼス、Ph・フランク、M・シュリック、H・ライヒェンバハ、R・カルナップらいわゆる Wien Kreis〔ウィーン学派〕の実証主義〔者〕がさかんに量子力学の成功を自分らの学説の証明のごとく書き立てて、また、P・ヨルダンのごとき量子力学の建設者が実証主義を標榜したため〔でもあって、それゆえ〕に、量子力学は実証主義的であるという観念はますます通俗的に普及することになった[14]。

われわれは、相対性理論におけるアインシュタインの「同時性」概念の批判やハイゼンベルクの観測可能な量への制限の例に徴しても、最近数十年来の物理学は科学の実証的精神をますます徹底せしめきたったことを認めなければならない。

しかし、本節のはじめに掲げたハイゼンベルクの条理を尽した考察をすることによって、われわれは、「物理学は直接観測しうる量のみを取り扱うべきである、と彼が主張した」とか、[15] いわんやフランクが評するごとく「ハイゼンベルクの功績のうちでとくに価値あるものは、物理学は窮極において知覚のみを取り扱うべきであることを示した点にあり」[16] とするごときは誇張と評すべきである。[18] かようにあまりにも認識論的の側面を誇張歪曲した論法には、長年物理学の真摯な研究に従事した学者は一種の反撥を感じるであろう。プランクやアインシュタインのごとき学者が量子力学の立場に満足せず、学界の主流から離れていった一つの動機は、彼らの理論的世界像がすでに古く弾力性を失ってしまったためとのみ考うべきではあるまい。むしろ、真面目な研究者の内容を措いて、量子力学がそうした偏頗な「科学批評」の宣伝の具に供せられたことを苦々しく感じたのがそもそもの起こりではあるまいか。こうした誇張をともなう「新しい」立場を理解しえないのではなくて、理解を欲しないのが彼らの偽らざる心理であろう。[19] レアリズムの心理のうちにはこのようなモラルが尊重されなければならぬ。

ハイゼンベルクがその建設にあたって放棄したのは、「原理的に」観測不可能な、しかもその適用が多くの矛盾や行詰りを招来した諸概念であったが、この見解はすでに当時多くの学者が認めていたものであったし（§9の末尾参照）、彼らが苦心して索めていた物理学の理論の実質的な内容という見地から言えば、一般的な認識論ではなくして、そうした古典的モデルを棄てたのちにいかにして具体的な量子論的関係の表現の手懸りを得るかにあった。ハイゼンベルクの創見は、マトリックスのごとき**非直観的な**量を、それこそ量子論的量であるとして、古典的な変数に対応させても、

これから正しい量子論的関係が導ければ差支えないという大胆な一歩にあった。この場合にも関係を見出すことでなくして基礎づけることが問題であった。もちろんそこには計算規則からの演繹に重点があり、力学的といってもレアリスティッシュなものを背後に求めるのはハイゼンベルクの態度を歪曲するものであろう。したがってかつての彼の師ゾムマーフェルトのごとき学者がハイゼンベルクの場合は「Machphilosophie〔マッハ哲学〕の唯一例外的な成功」と評し[20]、またボルンもマッハ〔のハイゼンベルクへの〕影響を述べている〔Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 57, part I, p. 1–18 (1936)〕。

ここで、ハイゼンベルクの研究を契機として提唱された物理学における実証主義を詳しく論じようとは思わないが、われわれは、どこまでも物理的現実を追究する実証的態度と科学批評家の一家言としての実証主義とのあいだにはしばしば著しい逕庭があることに注意せねばならぬ。

直接の感覚的経験の記述ということに科学の職能を限定しようとするようなラジカルな実証主義は今日では存立しないが、それはボルンも指摘するように〔前記文献〕、きわめて単純な外物の知覚にも形態 Gestalt の契機が前提されていることが明らかとなっている今日、すでに「純粋の感覚経験」というごときものの不可能は論ずるまでもない。これを考慮に入れ、さらに科学的な経験が可能になるための実験の条件に含まれたあらゆる理論的前提を考慮に入れて、かくして十分に修正された実証主義的認識論を建設しようとすれば、結局、ヨルダンが説くように、「科学以前の経験および概念構成の全体を前提しそれを補い、精密にし修正してゆく」というところまで拡張しなければならなくなる。[21]

カントによって批判されたスウェーデンボリの視霊から、クルックスやロッジの心霊現象の経

験に至るまで、(22)〔いずれも〕「感覚的な」経験には違いない。フランスの物理学者でナンシー大学の教授であったルネ・ブロンドロは一九〇三年、N線を発見したと称したが、これにヘルツの電磁波の実験と同等の「実証性」を認める物理学者はほとんどないであろう。いな、多数の物理学者が賛成しただけでもまだ十分とは言えない。それら多数の学者の経験が**技術的**なものと不可分離に関係して、われわれの全文化の一部に融合するところまでいかねばならぬ。すなわち、科学の**社会的機能**にまで及んではじめて真の実証性が得られる、とヨルダンは説明する。(23)しかし、かく理論が完全化すると同時に、これでは実証主義の特質の大部分は解消し去るものではあるまいか。

ヨルダンは、科学的世界観が前科学的なそれからどの程度まで独立であるかは意味深い問題であると言うが、これについて〔は〕シュレーディンガーが多分にシュペングラー的——とヨルダンは評する——であるが一つの才気ある考察を試みた。(3)彼によれば、「物理学も社会環境の影響を受けるもので、現代の物理学は、純粋の事物性、変革の要求、相対主義、合理的経験〔組織?〕や産業の複雑化にともなう大量支配の方法、細目の知識に対する賢明な断念（統計、平均）等において現代社会と特質をともにする」。しかし、自然科学がイデオロギーを背景に担うことを認めれば、その実証性もたしかにヨルダンの承認するごとく、漸進的なものとなる。その鋭さは失われるのである。実証性を判定する簡単な公式はないと言うのが真理であろう。

ベーコンが地動説に反対し、マッハが原子論と闘ったことは(24)実証主義の陥りやすい短見として批評されるが、彼らが誤謬を犯すことを恐れて何も主張しなかったならば、それは彼らの方法論の無力を示すのみであったろう。これに対し、ヨルダンが、現在実験的検証の可能性の乏しい光の

Neutrino〔ニュートリノ、いわゆる中性微子〕説に力を入れたことが、どれだけ彼の実証主義の主旨に適うものであるか。ここに至って学者の本能は学説よりも深く徹するのではないかと考えさせられるのである。

実証主義は、無意味 sinnlos または無内容 inhaltleer な問い、すなわちその答えの真偽を実験的に検証できないような問題を拒けると言われる。ハイゼンベルクも説くように、人間の言葉はなんら実証しうる内容ももたないような命題や概念を構成することがある。たとえば、われわれの世界と**原理的**にまったく無交渉な第二の世界があるとして、われわれは空想的にその世界について、種々の直観的な心象をつくることができるが、これは芸術や宗教では許されるとしても自然科学では証明も反駁もできない種類のものであるから、これに関連した問題は、ヨルダンのいわゆる仮現問題 **Scheinproblem** として拒けるべきものであると言う。[25] きわめて当然な主張であるが、現実の物理学の問題となると、ある命題や概念が無意味であるかと言うことは、簡単に見透しうるものではなく、確実な標準も存在せず、一定の理論的連関の範囲内でのみ決定できることである。ところが、問題になるような命題や概念は、多くはそうした理論的連関がいまだ十分確立されていないような領域に関係しているので、結局それについては明確な判定が下せなくなるのである。

相対性理論や量子力学は、従来意味があるものとして日常生活から借りきたった概念を、曖昧な、ときには無意味なものとして暴露した。したがって、そうした概念を使用すると、物理学はときに基礎の修正を余儀なくされる危険がある。しかし、そうかと言って、この危険を避けるために、すべて経験で験められた概念のみを用うるために、あらゆる科学の予備段階として、すべての曖昧さ

から言葉を浄化しておけばよいか。〔あるいはそのよう〕に思われるかも知れない。論理的実証主義の議論にはそのような傾向が存在するのである。しかし、この方法を実行することはまったく不可能である。なぜならば、かくては、曖昧でないような言葉はまったく残らず、研究は前提から前提へと無限に退行して停止するところがないからであり、またある概念を使用して将来修正の危険がないかを予(あらかじ)め判定する標準というごときものは一般には存在しないからである。まえもって概念を浄化しようという要求は、科学のあらゆる未来の発展を論理的分析で決めてしまおうという要求とほとんど同じことだからである。結局、われわれはひとまず従来の概念を使用して、理論的実験的に困難をきたした場合に修正するほかはない。[26] ここでも実証主義認識論の合言葉たる仮現問題とか無意味とかの概念に過当な評価は慎まねばならない。

かく言うも、近時、ともすれば宇宙論や基礎常数に関連して論じられる空想的な問題に対しては、あくまで現実の経験に立脚した物理的・実際的態度を保持すべきことは言うを待たないのである。哲学的論議のうちに Ernst der Sachlichkeit〔事実に即したまじめさ〕を失わぬことである。

(1) Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *ZS. f. Physik.* 33, S. 879 (1925)

(2) パウリはゼーマン効果における線の強度に関連して、これは古典的な Kinematik にかわる一般的量子運動学において解決さるべきであると注意した (Pauli, *Handbuch* XXIII, S. 68)。

(3) すなわちハイゼンベルクによれば、古典量子論の行詰りの「本来の原因は、正しく量子論の根本要請の本質に無縁な古典的な概念や表象を原子構造の問題に持ち込んだこと、直観的内容が実際はとうてい見通せなかったのに、物理的法則性の解明に簡単な直観的模型や抽象を利用した点にある」。

(4) Heisenberg, *Naturwiss.* 14, S. 990 (1926)

(5) 前節、クラマース－ハイゼンベルクの研究参照。

(6) Weyl, *Gruppentheorie und Quantenmechanik*〔Leipzig, 1931〕

(7) ただ行き過ぎた誤解を予防するために注意したいのは、ハイゼンベルクの研究がマトリックスの概念を用いずにおこなわれたごとく、一般相対性理論もその物理的骨子はリーマン幾何学を借りずに導き出されていることである。

(8) Bohr, *Quantenpostulate*, §4 対応原理とマトリックス理論 S. 45 s. *AT. NB.* にこの点は詳細に説かれている.

(9) Born, Heisenberg, Jordan, *ZS. f. Phys.* 35, S. 557 (1926)

(10) Dirac, The fundamental equations of quantum mechanics *Proc. Roy. Soc.* 109, p. 642. Heisenberg, Born—Jordan〔および〕ディラックのこれらの論文の梗概は「物理学文献抄Ⅰ」(岩波書店) に収められている。

(11) E. Mach, *Erkenntnis und Irrtum*, S. 418, Aufl. (1920) この思想はすでに *Die Geschichte und ide Wurzel des Satzes der Erhaltung der Arbeit* (Prag. 1872) S. 27 : 55 にも述べられている。

(12) J・ガイザーは Wahrnehmung の概念に含まれる曖昧性を指摘したが、ハイゼンベルクはこの Akt ではなく、Akt によって erleben された対象をいっているのであろう。Positivist は *αἰσθητόν*〔感覚でとらえられるもの〕を知るが verstehbarsein *νοητόν*〔思惟でとらえられるもの〕を知らぬ。Kramp, *Kant Studien* 41, S. 75 (1936)

(13) *ZS. f. Physik.* 43, S. 197 (1927)

(14) ヨルダンは「実証主義によって強く影響された現代物理学の認識論的見解を否認することは、量子力学を否認することになる」とまで主張して、それを例証するためにプランクらの古典的学者やバヴィンクのごとき解説家を挙げている (*A. QT.* の序文および *Physik d. 20. Jahrhundert* の第六章)。これと反対の立場に立つH・ディングラーも実証主義の認識論の誤謬と相対性理論および量子力学の根本的誤謬とを不可分離なものと考える。

(15) ゾムマーフェルトやプランクは、かくのごときものとしてハイゼンベルクの方法を批評する。前者では、たとえば *Wellenmechanischer Ergänzungsband*, S. 44 (1927)、後者では *Der Kausalbegriff in der Physik*, S. 9 (1932) 等。

(16) そのかぎり〔では〕Positivist が *αἰσθητόν* のみ知って *νοητόν* を知らぬという評も適切といわねばならぬ。

(17) Disskussion über Kausalität und Quantenmechanik, *Erkenntnis*, 2, S. 183～188 (1930)

(18) ともすれば誇張に走りがちなエディントンですら、これに関連して「The description should iuclude nothing that is unobservable but a great deal that is actually unobserved」〔*The nature of the physical World*〕

(p. 226) と言っている。

(19) すでに三〇年も以前からプランクが説いてきた（§5参照）、まず確固たる事実研究から出発し、しかるのち、一般的な世界観の問題へという態度は、たとえば彼の *Wege zur physikalischen Erkenntnis* (1933), Leipzig, S. 273 にも強調されている。

(20) 前掲 *Wellenmechanischer Ergänzungsband* および *Phys. Zeitschr.* 28, S. 231 (1927) 数物会誌 I. p. 70。

(21) 健全な科学的本能が限界づけを保証すればときにかなりの Extrapolationen も許されねばならぬ。*A. QT. S.* 279。

(22) エディントン、種々の体験可能性間の同権化 (20 Jahrh. p. 245) Telepathie—Gedankenübertragung。実証主義的テーゼによって基礎づける。

(23) Über den positivistischen Begriff der Wirklichkeit; *Naturwiss.* 〔20 (1932) S. 815、科学 3 (1933) 9〕

(24) ヨルダンは「二〇世紀の物理学」で、このマッハの原子論に対する態度を弁解しているが（邦訳二三五ページ）、マッハは単に原子を機械的に理解することに反対したのみでなく、原子の概念の使用一般に対して反対したのであるから、その弁護は困難であろう。もっともヨルダンは、原子は数学公式の足場として特徴づけられたものであるから、地球の地理学的経緯度と同様に根本的には単に実験的事実の整序のための補助概念にすぎないとしてまでマッハを弁護する（邦訳二三六ページ）。これは不当ないちじるしい混乱であるとともに、かく言えばすべての概念は補助概念と言わねばならない。

(25) Heisenberg, *Kausalgesetz und Quantenmechanik, Erkenntnis*, 2, S. 172. (1930) Königsberg での講演である。同じく著者 *Phys. Prinzipien d. QT.S.* 11. また Jordan, Anschauliche Quantentheorie。

(26) Heisenberg, Die Entwicklung der Quantentheorie 1918—1928. *Naturwiss.* 17, S. 494 (1929). 同じく Phys. Prinz. d. QT. S. 1. とくに Prinzipielle Fragen d. mod. Physik (1935) (*Wandlung in d. Grundl. d. Naturwiss.* S. 49〔訳文〔天野〕、科学 7. p. 203, 205 (1937)〕, ヨルダンもある意味でこれを認めている。*Naturwiss.* 22, S. 487 (1934)

〔1〕 選集版では「Göttingen に」

〔2〕 選集版では「操作が……」

〔3〕 講演 Ist die Naturwissenschaft Milieubedingt（ベルリン）、出版は一九三二年ライプツィヒ。

§11　波動力学の誕生と展開

ルイ・ドゥ・ブロイ Louis de Broglie（一八九二―　）はX線研究に一家を成すモーリス・ドゥ・ブロイの弟として、X線に関連して光量子の問題に関心し、(ここ)一九二二年には光のアトムの質量を論じたりしたが、結局、光の粒子性と波動性とは、そのいずれの一方をも完全には排除しえないことを認めて、その二重性をそのまま取り上げ、従来の光量子仮説の不十分な点を補おうとした。しかし、この正しい着想も、彼の種々の誤った推論[1]におおわれて具体的な結果はおさめなかった。

一方、原子内の電子の運動の安定性は、量子数という整数の存在によって可能になるが、従来の物理学で不連続的な整数性が入ってくる現象は、干渉ないし固有振動である。この事実に、まえの光の二重性を移して考えれば、物質もまた粒子性と並んで周期性すなわち波動性を有すると考ええないであろうか。

この着想をはじめて発表したのは一九二三年秋、フランス科学アカデミーに報告されたドゥ・ブロイの「Ondes et quanta（波動と量子）」なる一文である。[2]これは二頁にも足りない論文ながら、玉石混淆とも評すべき奇抜な、しかし歴史的な小篇である。

彼は特殊相対性理論の帰結を利用して、物質の内部エネルギー m_0c^2 と量子論における $h\nu_0$ を等置し、この簡単な関係から一方には、光量子の「質量」を算出するとともに、他方、物質粒子には、それが静止していれば振動数 ν_0 の定常波が、もし運動していれば相対性理論の補正を考慮した振動数を有する平面波が、粒子の進行にともなうことになる une onde fictive associée au mouvement du mobile。この波は光速度よりも大きな速度で伝播する位相波であるから、もとより単に架空的なものと考うべきで、エネルギーの伝達に対応するものではないが、これを閉通路に適用し、電子の運動が安定であるためには波が共鳴する必要があろうと考えれば、ちょうどこの通路の長さが波長の整数倍となって、これからボーア－ゾムマーフェルトの理論におけるような量子条件が導かれる。

二週間ののちには、このいわゆる「物質波」（ドゥ・ブロイがこれを une onde sinusoïdale non matérielle と呼んだのも面白い）の超光速度に対し、物質量子そのものの速度は、この波の群速度にほかならぬ[3]ことが指摘され、同時に次のごとき広大な展望がひらけた[4]。すなわち、位相波に対するフェルマの原理は、粒子に対する Maupertuis 型の最小作用の原理と同一になるが[5]、もし粒子が位相波の波長に比して小さい孔を通過する場合には回折現象が見られること光の場合のごとくであろう。ここに実験確証が待望される。

彼はさらに「La nouvelle dynamique du point matériel libre est à l'ancienne dynamique (y compris celle d'Einstein) ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique.（自由質点の新力学が——アインシュタインのそれを含む——古典力学に対す〔る〕こと、あたかも波動光学が幾何光学に対する如し）」と称し、十七世紀以来の発展の理論的綜合であ

るとの抱負を述べた(6)。

しかし、ドゥ・ブロイは波動光学に対応する波動力学ともいうべきものを数学的に展開するには至らなかったので、その点のみから言えば彼の理論はボーアの半古典的量子論と同一の段階にとどまるものであった。波動力学を実際に建設することはシュレーディンガーに残された仕事であった。

ドゥ・ブロイのイデーが、デヴィソン－クンスマンの実験やラムスアウアー効果のような事実を説明する拠りどころを与えたが、最も直接な電子波回折の現象が、最初に偶然な出来事から発見されたのは興味がある。

C・〔J・〕デヴィソンとL・H・ガーマーはニューヨークのベル研究所 Bell Telephone Laboratory でNiの対陰極 target で散乱された電子の角度分布を研究していたが、一九二五年の四月液体空気の壜が破裂して管が壊れ、対陰極はひどく酸化された。それを除いたつもりであったが分布はまったく変化してしまった。これが彼らにちょうどX線の場合と同じような波長 $\lambda=\frac{h}{p}$ なる電子の回折を気づかしめたのである。



L. ドゥ. ブロイ

ついでJ・J・トムソンの息子のG・P・トムソンらが、各種の実験方法がいずれもX線と類似した電子の波動性を示すという本格的な研究を発表したが、とくに、わが理化学研究所で西川正治博士指導のもとに菊池正士

氏が見出した結果は最も学的内容の豊富なものであった。[8]

デヴィソンとG・P・トムソンとがこの研究の功績によって一九三七年度のノーベル物理学賞を受けていることを付記するのも無意味ではあるまい。かように、本質的には古典的な波動論を脱しないドゥ・ブロイの理論がともかく電子回折の実験に簡単な説明を与えうるのは、古典論と量子論との対応的な相似性の結果であって、ウィルソン霧函や屈曲の実験が古典力学で説明されるのと同様である。厳密な量的理論は量子力学にまたねばならぬ。[9]

ドイツにおいて、このドゥ・ブロイの構想をいちはやく採り上げて、その優れた意義を紹介したのは、またもアインシュタインであった。これよりさき、一九二四年アインシュタインはインド、ダッカ大学のS・ボースの論文「プランクの法則と光量子仮説」を訳出して、いわゆるボース－アインシュタインの統計法を述べた〔*Zs. f. Phys.*, 26, S. 178 (1924)〕が、アインシュタインはこの理論が輻射と気体とのアナロジーを徹底的に遂行して、プランクの式を導く点に興味を感じたのであろう。このボースの統計の数え方を単原子気体へ適用する際、一つのパラドックスに逢着した。すなわち、これによると二種の気体の分子が（とくに〔分子〕質量〔と〕体積〔の点〕で）きわめて類似している場合でも、両者の混合気体と一方のみの同数分子を含む気体とは、圧力および状態分布をまったく異にすると帰結されるかに見える。しかし、これはきわめてありそうにないことである。

ところが約五ヵ月ほどしてアインシュタイン〔*Berlin. Ber.*, S. 261 (1926)〕は、ドゥ・ブロイの物質波のイデーをとらえてこれを（ドイツ学界があまり大した注意をはらわなかったので）簡明に紹介するとともに、これを輻射の揺動に応用し、上述のパラドックスを説いている。すなわち、物質波

においても二つの波長が大体一致すれば波はいちじるしい干渉を生じ、したがって上記のごとき混合気体も相加的 additiv な性質をもつ。分子衝突の場合には力学的な屈曲以外、古典的に理解できない屈曲も生じる。これはボーアも他の根拠から推測したところであった〔*Berlin, Ber.*, S. 3 (1925)〕。

一九二六年の初頭、すなわちハイゼンベルクの論文があらわれて約半歳ののち、*Annalen der Physik* に「Quantesierung als Eigenwertproblem」なる論文の第一報告と称するもの[10]が発表され、たちまち学界の注目をひいた。著者エルヴィン・シュレーディンガー Erwin Schrödinger〔一八八七―一九六一〕は、若いころウィーンでL・ボルツマンに学んだ人であるが、チューリヒ大学の教授として原子構造論（Na原子の Tauchbahn〔貫入軌道〕）や揺動の問題、相対性理論と新しい理論物理学の各方面に研究を拡げていたが、まえにも触れたように輻射の量子論にとくに関心をもっていた（§9参照）。

彼はドゥ・ブロイの研究やアインシュタインの応用等からヒントを得、通常の量子化則は「整数」なる語を全然用いないポステュラートで置き換えうる。すなわち、整数性は、あたかも振動する弦の節点数 Knotenzahl の整数性のように、自然な方法で出てくると冒頭する。まずこれは水素原子の場合につき例示されるが、この新見解は一般化ができ、量子則の真の本質に深く触れるものがあると信じるのである。

シュレーディンガーは言う。通常の量子化説を用いるハミルトン－ヤコビの偏微分方程式 $H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right)=E$ で、各一個ずつの独立変数の函数の和としてあらわれる解Sに、積としてのΨを換え、$S=K\log\Psi$（Kは作用の次元をもつ〔$\hbar$に相当する〕）すなわち、$\Psi=\exp\left\{-\frac{2\pi i}{h}S\right\}$ とすれば

方程式は波動振幅Ψに対するものとなる。そこでこの方程式の解を求めるのではなく、方程式をΨおよびその一次導函数の形にしたうえで変分を施し、その結果得られる方程式 $\Delta\Psi+\frac{2m}{\hbar^2}\left(E+\frac{e^2}{r}\right)\Psi=0$[12]は、$r$の境界点で有限な解を得るためには常数$E$が、ある特定な値をとらなければならない[13]。この特定の値を定めること、いわゆる固有値問題 Eigenwertproblem こそ全研究の springender Punkt〔跳躍点〕である。すなわち、この固有値が結局原子のエネルギー準位を決定するものである。この際、連続スペクトルの存在も同時にあらわれることにも注目を要する。

シュレーディンガーは彼の考察がドゥ・ブロイの位相波のイデーから示唆されたことを快く認めるとともに、それとの差違を、進行波に対して、定常波の固有振動を導入した点に見ている。彼は函数Ψを原子中の振動過程に関係づけるのは、電子軌道よりも実在性があり、量子現象も、電子が飛躍すると見るよりも、エネルギーが一つの振動形態から他のそれへ移ると考えるほうが表象しやすいとして、多分にこの直観的な見解を重視しているが、一方、通常の振動のごとくならば原子は固有振動の「Potpourri(ごった)」を同時に発射するはずであり、それは唸り Schwebung, beat のアナロジーから説明されるが、多少技巧的な解釈も要するので、振動過程の表象可能性はより複雑な場合を計算したうえで論じることにして、ひとまず中立的な数学的形で展開したのである。

待望のうちにあらわれた「第二報告[10]」ではハミルトン力学と光学とのアナロジーに関する広大な学説史的展望を背景として「波動力学」の基礎づけがおこなわれる。

力学的問題におけるハミルトンの偏微分方程式と波動伝播の過程との関係は、すでにハミルトン自身、十分に知っていたばかりでなく、彼の不均質媒質の理論から生まれた力学理論の出発点にな

ったのである[15](一八二四)。「ハミルトンの変分原理は Konfigurationsraum (q—空間) 中の波動伝播に対するフェルマの原理として把握され、その偏微分方程式は、この波動伝播に対するホイゲンスの原理を表わすものである」。しかるにハミルトン以後光の粒子説の退却にともない、ハミルトンの意味深いイデーはその美しい直観を忘れられ、単に無味乾燥な解析的関係のみが保存された。フェリックス〔・クライン〕のごとき達眼の士が一八九一年ハレの学界でその重要性を強調しても、一般の注意をひかなかったのであった。これがふたたび復活されたわけである。

ハミルトンの理論はかく示唆深いものであるが、それは本来は力学と**波動**光学とのアナロジーとは言いがたい。何となれば、力学の主として関与する線 Strahlen の概念は**幾何**光学に属してそれに対してのみはっきりした概念である。振幅、波長、振動数のような波動論に重要な概念〔に〕は力学的な対応物がない。しかし、古典力学もきわめて微小な軌道や、非常に急激な軌道の屈曲に対して成立しないことが判明した今日、幾何光学が、波長に対して十分大きくない「障害物」や「孔」の存する場合に成り立たぬのと完全なアナロジーがあると見なければならない。そこで「波動的力学 undulatorische Mechanik」が必要になるが、その建設〔に〕はハミルトンのイデーを波動論的に完成するのが近道である、かくシュレーディンガーは波動力学の方法を歴史的に根拠づけるのである。

当時、シュレーディンガーは「原子中の電子運動の位



シュレーディンガー

相には実在的意義がない」と考える点ではハイゼンベルクやボルンと似ておったが、量子力学の真の法則は個々の軌道に対する一定の規則にあるのではなく、系の全軌道群の要素がこの法則のなかで結合され、あたかも別々の軌道間にある種の交互作用が存立するように見える」と称して、前記のごとく多数の振動の唸りの現象とのアナロジーを信じていた。これはのちにボルンらが批判し、拒けたところである。

しかし、シュレーディンガーはそれを、実験的所与を注意深く分析すれば当然了解されるところとし、一面において「電子の位置」や「軌道の概念」の崩壊を主張しながらも、それかと言って、一部の学者が原子のなかの過程を空間－時間的思考形態に容れうるかを疑うのは、あまりに極端であり、「哲学的立場から見て、まったくの武装解除にほかならない」とするのである。「なぜならばわれわれは思考形式 Denkformen を現実に変えることはできないし、その形式のなかで理解しえないことは、いかにしても理解しえないからである。そのような事物も存在はするが、自分は原子構造がそうだとは思わない。……それは幾何光学者が回折現象を粗視的光学で確かめられた光線概念をもって解決しようと試み、それに失敗を重ね……**幾何学の法則**は回折現象には適用できない、と考えるようなもの」で、このアナロジーときわめて密接な当面の問題でもそれは明らかに誤りであると判決した。

彼はハイゼンベルクらの研究と自己の学説の傾向の近いことを認め、両者は相補うものであろうと言い、ハイゼンベルクのはスペクトル線の強度を与える点で優れているが自己の研究の強味は、「粗視的と微視的な力学的事象の間を架橋する die Brücke zwischen dem makroskopischen und dem

mikroskopischen mechanischen Geschehen schlagen」点にありとした。

ところが翌月には、ついに彼自身の手によって、ハイゼンベルク－ボルン－ヨルダンのマトリックス力学と彼の波動力学との数学的関係が明らかとなった。[16] シュレーディンガーは初めは両者の発生的な関連は全然意識しておらず、もちろんハイゼンベルクの研究を知らないわけではなかったが、超越代数の方法がむずかしそうに見えたし、直観性がないので、たとえ反撥は感じない〔abstossen ではない〕までも恐れをなしていた〔abgeschrekt〕という。

しかし、両理論が旧(ふる)い半古典的量子論と食い違う場合にも**相互には**よく一致するのは、いわゆるマトリックス力学の「真の不連続理論」と波動力学の「連続理論」とのあいだには表面上の対立にもかかわらずじつはきわめて密接な**内的連関**があることを予想させるが、シュレーディンガーは、形式的数学的見地から言えば、両者の**同一性**を言うも不当でないことを証明しようとする。[17]

この同等性の証明の要(かなめ)ともなったのは、$2n$ 個の量 q_1、q_2、……q_n、p_1、p_2、……p_n（位置およびそれに共軛な運動量座標）の函数に対するハイゼンベルク独特の計算規則が、n 個の変数、q_1、q_2、……q_n の領域の線型微分演算子 Differentialoperatoren に対して通常の解析で成り立つ計算〔規則〕[1] と一致する点に着目したことである。この対応をつけるには、函数中のすべての q_l を演算子 $\frac{\partial}{\partial q_l}$ で置き換えて、$\frac{\partial}{\partial q_l}q_l - q_l\frac{\partial}{\partial q_l}$ なる運算子を q_κ の任意の函数に適用すると、元の函数が再現される。すなわち、この演算子は Identität〔同一〕である。この簡単な事実が、マトリックスの領域では、ハイゼンベルクの交換関係として表現されている。

そこで、例の交換関係を満足するマトリックスを位置および運動座標の函数に相応させ、それぞ

れ特殊の問題に応じてハミルトン函数のマトリックスと結びつけ、いわゆる「運動方程式」を構成すると、シュレーディンガーの波動力学の微分方程式の自然的な境界値問題を解くことは、ハイゼンベルクの代数的問題を解くことと完全に同等となり、「遷移確率」ないし「線強度」を決定すると思われているハイゼンベルクのマトリックス要素は、すべて（最初はどうかと思われたが）波動力学からも計算できることになった。

したがって、両理論の優劣のごときは単に見かけだけである。二義的な計算の便宜上のことである。しかし現今、キルヒホフやマッハの精神を汲んで、できるかぎり、原理上観測不可能な要素を借りず、観測しうる量のあいだの経験的関連の最も簡単な数学的記述をおこなう点に物理学の理論の使命を認める学者が少なくない。この見地からすれば、数学的同等性はほとんど物理的同等性と同じことである。マトリックス的表現の利点といえば、たかだか、それが非直観的なので、原子的事象の原理的に検証できないような空間・時間的像を造る誘惑がないというくらいのものであろう。しかも、両理論の同時性は逆方向にも成り立つ（すなわち、マトリックス力学から波動力学を導出することもできる）ので、波動力学にもなんらの贅物も含まれていない。固有函数は「裸なマトリックスの骸骨に肉の衣を纏わせて直観性の欲求を満足させるような、恣意的・特殊的なものではなく」したがって、「認識論的にも譲るところはない」、とシュレーディンガーは論じた。[18] むしろ、シュレーディンガーをして遠慮なく言わせれば次のような場合には波動力学のほうに有利である。

原子力学には、本来の光学的問題以外にも、今後の建設に考慮すべき問題が実験物理学の方面か

ら優れて直観的な形で提出されている。たとえば原子や分子の衝突、電子やα粒子の原子による屈曲等の問題を論じるには「粗視的な直観的力学と原子の微細力学とのあいだの連続的推移を概観することが是非とも必要となる」。したがって、かような場合いかがわしい認識論的理由で、原子理論では直観を抑圧し、単にエネルギー準位とか遷移確率のごとき抽象的概念のみを取り扱おうとするのははなはだ困難である、と彼は考える。

　このシュレーディンガーによって指摘された事実は、もちろんマトリックス力学の固有の欠陥を示すものではないが、少なくとも当初はその方面から取り扱われなかった一つの重要な問題を含むことを否定しえない。上述のような問題ではなんらかの意味で「電子の位置」のごときものを考えないならば、必然的に直観的な実験の操作そのものが不可能になりおわるであろう。ボーアものちに述べたごとく、たしかにハイゼンベルクの最初取り扱った光学的な問題ではかかる事情が表面にあらわれてこなかった。そのために空間時間のごとき直観的概念を考えないですんだのであった。

(1) たとえば、*Annales de Physique* 31, p.22 (1925) 抄訳物理学文献抄、第一輯 四一—八二ページ（岩波書店）に見られるような光量子の質量、cより小さい速度、干渉の解釈等はいずれも正しくない。
(2) *Comptes rendus*, t. 177, p.507 (10. sept. 1923), *Nature*, 112, p. 540 (Oct. 13. 1923) も同様の内容である。
(3) すなわち、粒子の速度に対応する振動数ときわめてわずかに異なる振動数を有する多数の波の群速度は、かのレイリー卿の導いたごとく、$\frac{d\nu}{dk}$ ないし $\frac{dE}{dp}$ に等しい。
(4) *Comptes rendus*, t. 177, p.548 (24. sept. 1923); *Phil. Mag.* 47, p. 446 およびさらに完全には前掲 *Ann. d. Physique*. 3, p.22. (1925) 数物会誌I、九八頁（一九二七）物理学文献抄Iには詳細に展開されている。
(5) これはすでにW・R・ハミルトンが幾何光学と古典力学とのアナロギーとして、ほとんど一世紀も前に証明したところである。

(6) したがって、ドゥ・ブロイの波動力学の本質は一九二三年に発表されているので、彼の Thèses, Paris (1924) やその他の本質的には加えるところの少ない論文の発表された一九二四年をもって物質波の理論の創設された年とするのは不適当である。なお、彼の *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire* (1930) 渡辺慧氏訳「波動力学」や *Quanta et lumière* 河野与一氏訳「物質と光」(岩波新書) 等を参照されたい。

(7) *Phys. Rev.* 30, p. 705 (1927), *Nature* 119, p. 558 (1927)

(8) S. Nishikawa & S. Kikuchi, *Nature* 122, p. 726 (1928), *Proc. Imp. Acad. Jap.* 4, p. 475 (1928) Kikuchi, *Jap. Journ. Phys.* 5, p. 83 (1923) 電子の波動性の実験に関する菊池氏の綜合報告。*Phys. Zeitschr.* 31, S. 777 にはとかく外国では見落とされがちであったわが国の(主として西川研究室の諸氏の)優れた研究も十分紹介されている。

(9) Heisenberg, *P. QT.* S. 98～99 参照。

(10) E. Schrödinger, Quantesierung als Eigenwertproblem Ⅰ, *Ann. d. Phys.* (4), 79, S. 361 (1926) 今日Ⅲ〔同前 S. 489〕とともに *Abhandlungen zur Wellenmechanik* (1927) に集録されてある。

(12) 一般に $\Delta\Psi+\frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-V)\Psi=0$ の形にかかれるこの方程式に対し、のちにシュレーディンガーはΨの変化の法則をも含めた $\frac{h^2}{8\pi^2 m}\Delta\Psi-V\Psi=\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\Psi}{\partial t}$ をもって本来の**波動方程式** Wellengleichung と呼んでいる。*Ann. d. Phys.* 81, S. 109 (1926)

(13) シュレーディンガーが告白するところによると、彼は当初、この数学的理論に通ぜず、同じチューリヒの数学教授だったヘルマン・ワイルに教えられるところ多かったそうである。

(15) W. R. Hamilton, *Trans. R. Irish. Acad.* 15, p. 69 (1828); 16, p. 4. 93 (1830); 17, p. 1. (1837)

(16) Schrödinger, Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen. *Ann. d. Phys.* (4) 79, S. 753 (1926)

(17) これは同じころ C. Eckart. *Phys. Rev.* 28 p. 711 (1926) 数物会誌Ⅰ、一一八頁(一九二八)に、独立にやや不完全ながら同等性が示された。

(18) ハイゼンベルクなどもかく言うのが真意ではなかったことは前章から明らかである。これはまさしくコペンハーゲン的な問題提起の様式に一致する。なお *ZS. f. Phys.* 43, § 196 の脚註参照。

〔1〕 選集版では「……計算とが……」。

〔2〕 選集版では「……經驗的關連を最も簡単に數學的記述を……」。

§12 波動函数の物理的意味に関する初期の解釈

マトリックス力学と波動力学との数学的同等性が証明せられ、個々の物理的問題が主として後者の方法[1]によって急速に取り扱われるにともない、物質の波動性が通俗化され、他方にはシュレーディンガーの理論にあらわれるいわゆる波動函数がいかなる意味をもつかが種々の方面から論じられた。それらの解釈は、今日から見ればすでに大部分は克服されてしまった単に歴史的興味しかないものであるが、量子力学がいかに古典理論の考え方から一歩一歩解放され、いかにしてまったく新しい物理的概念を確立するに至ったかを追体験し、この理論への洞察を深めることは無益な企てではあるまい。

すでに前節でも触れたように、シュレーディンガーは彼の固有値問題の第一報告において物質の波動性に対するドゥ・ブロイの思想を発展させて、原子振動系としたが、回を重ねるにつれ彼の波動函数に対する解釈もしだいに具体化してきた。

シュレーディンガーの当時の見解は、量子論に特徴的な不連続性を単に外見的なものとして連続的波動論の見地から解明し、もって前述のごとき直観的・粗視的な現象と原子的現象との間隙を架

橋しようとするものであった。したがって彼の理論は従来の古典理論に対し単に精密化を意味するのみで、理論の対象の概念や、一般に認識論的な立場に大きな変革・転換を意味するものとは考えなかった。このころの彼の小論文「Der stetige Übergang von der Mikro- zur Makro-mechanik（ミクロ力学よりマクロ力学への連続的移行）[2]」の表題は彼の根本態度の表現と言うことができる。

波動函数Ψに対する彼の解釈もこの基本的な線[1]に沿っている。すなわち、座標空間内の一定のΨ分布は実在空間内の電気の連続的分布と解釈される。電子は原子の全範囲を塗りつぶしたverschmieren ような一種の荷電雲 Ladungswolke であり、電荷の空間密度は $\rho=-e\Psi^*\Psi$ のごとく与えられ、その保有〔存?〕に関しては規格化の条件 $\int\Psi^*\Psi=1$、流体力学に見るごとき連続方程式 $\frac{\partial\rho}{\partial t}+\mathrm{div}J=0$ が成立する。Ψ函数はこの電荷の密度の、きわめて実在的な電気力学的に有効な変動 die höchst realen, elektrodynamisch wirksamen Fluktuationen のすべてを、ただ1つの偏微分方程式によって数学的に処理し概観する役割を演じる。

とくにこれがn個の結節点としてn個のループを有する空間中の定常波となる場合には、その振幅 $\Psi_n e^{2\pi i\nu_n t}$ は、原子の1、2、……n番目の定常状態に $-e\Psi^*_n\Psi_n$ なる電荷密度を励起させると電磁波動論的に考えられる。この定常的振動の結節点やループの位置は時間が経っても変じないから、電磁的な光波も発射吸収しない。かくして定常状態が輻射によってエネルギーを失なわない理由が説明される。

一方この種の二つの定常波は相互に干渉しあうと考えられるが、物質波 $\Psi_n e^{2\pi i\nu_n t}$ と $\Psi_m e^{2\pi i\nu_m t}$

とが重畳されると、その密度 ρ_{mn} に対し、$(m-n)$ 個の高低を有する**唸り**が起こり、それの位置は $\nu_m-\nu_n$ なる振動数をもって時間的に変化する。マクスウェルの理論によれば ρ_{mn} は振動数 $\nu_{mn}=\nu_m-\nu_n$ なる電磁波を発射せしめるが、これはリュドベリーリッツの結合関係にほかならない。[3]

しかし、このシュレーディンガーの考えのごとく、すべての固有振動が同時に惹起されて干渉するとすれば、原子は同時に多くの定常状態にあることになり、これはボーアの根本要請にももとることになる。もちろん原子内の過程は非常に複雑な現象で、彼の主張をただちに否定しえないとしても、この弁解は「未知の国土へ進入するにあたって、兵糧を給する郷土〔である〕観測の国と通ずるすべての橋を自らの後に断つものである」[4]という批評を受けなければなるまい。同一の原子から多数のスペクトル線が実際同時に発射されるとしてもなんら経験に矛盾しないという彼の見解[5]は、個々の原子はつねにある決まった定常状態にあることを確かめたフランク－ヘルツの実験結果と撞着するものである。

シュレーディンガーは「荷電雲によってある意味で Rückkehr zur elektrostatischen und magnetischen Atommodellen〔静電的原子模型および磁気的原子模型への復帰〕を語りうる」とするが、[6] 荷電部分相互の静電的反撥がいかにして避けえられるかの疑問はこれに対して躓き(つまず)の石である。

かくてシュレーディンガーは、物質の粒子的性質を説明する粒子自身が波動場から構成されるという考え方を提出し、原子の高い励起状態では固有振動の和はきわめて狭い空間範囲を除き、相互に干渉しあって打ち消す結果、微小な wave packet〔波堆、今日いう波束〕を生ずると指摘し、まず調和振動子の例について、それが一定の微小な波堆をなして運動することを証明した。[7] これは

「波堆が小さく保たれるかぎり、その重心は、古典力学の運動方程式によって決定される軌道に沿って運動する」ことを証明したP・エーレンフェストの定理[8]と照応して一応有望に思われ、幾何光学とのアナロジーも完(まっと)うされるかの外観を呈するが、じつはかえってこの点で彼が出発点とした光学とのアナロジーは破れ去るのである。なぜならば光には wave packet のごときものは存せず、かようなものが存在せばそもそも光量子のイデーも贅物にすぎなかったであろう。

それのみではない。ボルンはまず調和振動子の特殊な例がなんら wave packet の実在性を証明するものでないことを指摘したが、ハイゼンベルクも評するごとく調和振動子以外のすべての場合にはその振動数は基本振動数の整数倍ではないので、時間がたつにつれて波堆は全空間に拡がってしまうのである。[9]

加うるにシュレーディンガーも早く認めていたごとく、Ψ函数で記述される波動は一般に通常の三次元の実在空間内の過程の直接の記述ではなく、任意の力学系へ適用すれば一般化された q-座標空間 Konfigurationsraum〔配位空間〕で記述する必要を生じ、たとえばN個の等しい粒子の密度函数 $\rho=\Psi\Psi^*$ は$3N$次元の座標空間に対してのみ定義されるから、[10] 通常用いられる言葉の意味では、波動が「実存する existieren」とは言えない。「現実の事象は正確にはただ波の運動によってのみ記述されるが、これは必ずしも現実に存在するものが波の運動であることを意味しない」とは彼の告白である。[11]

かくて原子的事象に対して最も有力な数学的手段を決するシュレーディンガーの波動力学も、その基礎的概念たる波動函数Ψの物理的意義に関しては彼自身から満足な説明は与えられなかった。

エディントンは「シュレーディンガーの理論がハイゼンベルク、ディラックのそれに比して最も大衆的であるのは、それが誤解されるに十分なほど簡単なためであろう。彼の考え方がそのままの形で長く生き残るとは思われない」と、一流の批評を下したが、[12] じつはシュレーディンガーの解釈の不徹底は深くその認識論的素朴さに由来するものと見なければならない。

L・ドゥ・ブロイやシュレーディンガーの波動力学の創唱には、嘆賞すべき天才的直観を否定しえないが、両者の業績はどこまでも素朴な自然的立場を離れず、アナロジーによって古典粒子力学の軌道概念を波動概念に置き換えるにあった。いわば特定の物理学的概念を他の特定な概念に換えたのであって、それらの概念そのものの成立の批判、概念構成の方法に対する深刻な反省を欠いていた。それは従来(ママ)力学の精密化であっても直接無媒介の移行であり、ハイゼンベルクの場合のごとく根本的な否定に媒介された飛躍をともなわない。これが、あらゆる計算上の成功にもかかわらず、原理的問題の解釈の段[2]で彼らが躓(つまず)いた理由であった。

シュレーディンガーが波動函数Ψによって表現される波動を実在的に解釈するうえに一つの障害として認めていたものに、Ψが複素 Komplex 函数であって、系の状態についてなんらかの結果を得るにはつねに二つの波動函数を要するということがあった。すなわち、ただ一つの質点がポテンシアルエネルギー $U(r)$ の作用下に運動する場合のシュレーディンガー方程式では必ずしもΨをコムプレックスとする必要はない。それは任意の一定複素因子を除いては reell〔実数〕であるからだ。しかるに一度 Vektorpotential〔ベクトルポテンシャル〕$\mathfrak{A}$ の導入をおこなうときは、もはやΨはコムプレックスとなるがゆえに、原則的にはΨはつねに複素函数と考えざるをえない。[13]

のちにパウル・エーレンフェストはΨの複素性の本質について公開の論文において学者の解答を求めた[14]が、W・パウリはただ一つ実函数をもってしては体積積分によって時間的に一定などこ〔で〕も負にならぬ確率を構成しえないからだと答えたが、[15] Ψの実部分は時間について一次の微分方程式を満足しないことが注意された。確率が四次またはより高次の形なくしてすむことは、ただ結果が教えるのみである。また、ディラックの相対論的電子方程式の場合には多くのΨ函数によって確率函数が構成されることは人の知るところであり、メソンの場合に困難が生じた[16]ことも注意さるべきである。

波動場の量子化によればΨとΨ^*の交換関係からボース－アインシュタイン統計ではなお物理的に不合理ではないが、フェルミ－ディラック統計にしたがう粒子の場合にはΨとその共軛〔役〕のΨ^*函数は交換関係がプラスを含むのでまったく離れた空間点においても同時に精確には測れぬという不合理を生じる。これは一定の位置で一定の時にΨの値を測定する実験の存在せぬことを意味し、これは数学的には輻射と物質との交互作用の場合にも物質部分はΨの二次の項のみ、すなわち$\Psi\Psi^*$の形でのみこれを含むことを意味する。[17]

これに反し純粋状態における$\Psi\Psi^*$、$\dfrac{\partial\Psi\Psi^*}{\partial t}$は原則的には観測可能な量であり、ある一定な時刻$t$における両者の値を知れば、トリヴィアルな一定位相の常数因子を除き、Ψそれ自身は[3]決定される。純粋状態の$\Psi(t)$は原則的には決定されることはE・フェーンベルクが証明したという。[18]

シュレーディンガーの解釈と対立してあらわれ、たちまち広く学界の賛成を得たのはボルンの統計的解釈である。[19]

かつてアインシュタインが光量子仮説を提出した際、マクスウェルの波動論を統計的平均と解釈し、ドゥ・ブロイの物質波を応用する場合にも確率の概念を予想したことはすでに述べた。ボルンは、前期量子論が企ててついに成功を見なかった非周期系の量子論、とくに衝突の理論を新しい量子力学の立場から攻略しようとしたが、マトリックス力学からは困難であったから、シュレーディンガーの波動力学にたよることになった。かかる問題に直面して空間時間内の過程の記述を諦めたハイゼンベルクの見地に満足しえなかったボルンは、一時は波動力学こそは量子法則の最も深い表わし方であるとまで考えたのである。しかし、シュレーディンガーのごとく物質波に「光波がもつ〔の〕と同様の Realität〔実在性〕を帰する」考え方にも賛成できなかった。ここにボルンは波動に「第三の解釈」を与えるものとして、アインシュタインが提唱した、光量子が進む方向の確率は与えるがそれ自身としてはエネルギーも運動量ももたぬ幽霊場 Gespensterfeld の概念を電子の運動へ転用し、その運動方向の確率を与えるものとして、シュレーディンガーの〔波動を〕幽霊場、より適当には誘導場 Führungsfeld と見なしたのである。そこで電子の運動は単にエネルギー〔保存則〕および運動量保存則で制限されるだけで、一定の軌道に対してはそれぞれ波動函数の値の分布にしたがって確率が与えられるのみである。しかしこの確率の時間的変化はシュレーディンガーの波動方程式で決定されるので、パラドキシカルに言えば「粒子の運動は確率則にしたがい、確率そのものは因果法則に一致して伝播する」わけである（ボルンの最初の確率的解釈の定式化とのちの一般的統計解釈との関連については§12〔本書一六三頁以下を〕参照）。

衝突現象に適用されて成功した確率論的解釈は、ガモフやコンドン－ガーネイが原子核からの α

粒子の漏出を論ずる際に利用され輝かしい確証を得た。[20] α 粒子が核のポテンシアルの山（Gamow-Berg と呼ばれる）を越えるか反撥されるかは、まったく確率的にのみ計算される。この確率は粒子のエネルギーの連続函数であって、古典力学ではポテンシアルの山の高さ（数学的な一線）を境界として、通過するか反撥されるかが不連続的に変わるが、量子力学的にはこの確率の変化はかえって連続的である。

不連続の概念の導入を特徴とする量子力学は、これらの問題では確率概念の導入によって連続性の原理をも包摂し、古典論的に不自然な不連続性を解消せしめる。[4] この事態は古典力学の非現実性と量子力学の現実把握の哲学的深さを看取せしめるものとしてきわめて興味深いものがある。すなわち量子力学は波動函数の確率的解釈において、実在の統計的連続性と個別的不連続性、理念的必然性（学問的可能性）と非理念的偶然性、理論の予料性（未来性格）と測定結果の既定性（過去性格）のごとき対立概念の本質に重要な洞察を与えるのであるが、これについてはこれらの対立の物理学的な相互補足性を論じる際に縷説する機会があろう。

さて、上述のごときポテンシアルの山による波動の分裂はΨ函数の確率的解釈を根拠づける一方、波動の実在的解釈には致命的な打撃を加えることになる。アインシュタインは一九二七年のソルヴェイ会議で次のようなパラドックスを提出した。すなわち細隙から出た波動または半透明の反射鏡についての思考実験において、測定に際して波動パケットは超光速度で収縮することになる。その他にも幾多の思考実験が、最初有望に思われた波動の実在論的解釈に対するパラドックスを提供した。[21]

このような有利な状況に恵まれてボルンが提唱した波動函数の確率的解釈は、それが内含する曖昧さを深く検討されずにやがて学界に広く流布し常識化するに至った。この事実は同時に、ボルンが付け加えた決定論 Determinismus 否定の問題を学界論議の題目とするに十分な理由を与えるものであった。ボルンによれば「シュレーディンガーの波動力学は衝突現象に明確な解決を与えるが、これはなんらの因果関係を取り扱うものではない。新力学の立場から言えば個々の粒子について衝突の結果を因果的に確定する量はない。そのような原子の内部的性質は経験的根拠がない。われわれは将来かかる性質（たとえば原子内の運動の位相のごとき）が発見されてそれが個々の量子的事象を因果的に決定すると期待すべきであろうか。あるいはまた因果的経過に対する条件を与ええない点で理論と経験とが一致しているのは、そのような条件が存在しないことに基づく一種の予定調和 prästabilisierte Harmonie と信ずべきであろうか」。ボルンはかく反問して「自分は原子的世界における決定性を放棄することに傾いているが、これは一つの哲学的問題であって物理的議論だけで解決されない」と用心深くつけ加えている。「いずれにせよ実際的には、実験物理学者にも理論家にも不決定論が成り立ち、実験家によって種々と研究された『Ausbeute〔収量〕函数Φ』は理論的にも厳密に把握される」。かくして樹立された「力学と統計学との緊密なる結合」はのちの研究方向を規定するものであった。[22]

すでにブラウン運動の確率論的理論の成功以来、スモルコフスキ[23]、ショットキー、R・v・ミーゼスら[5]は、統計的研究あるいは物理的研究の体験から、あるいはヒューム、マッハの流れを汲む実証

主義的傾向から、しばしば自然現象のアプリオリな因果決定性の学説に反対し、**確率的法則**をもってこれにかわるべきものと主張していたが、これは、一九一六年―一七年アインシュタインの輻射論で spontaneous emission〔自然放出〕が確率的に取り扱われ、「**無原因な過程**」として解釈されることにより、ますます有力となっていた。

面白いこと〔に〕はシュレーディンガーその人が波動力学建設より数年以前チューリヒ大学への就任演説「**Was ist ein Naturgesetz?**〔自然法則とは何か〕」(一九二二)[24]において、「粗視的現象における厳密なる因果決定性はじつは無数の要素的過程の結果たるにすぎず、絶対的一次的な偶然をまったくのナンセンス、論理的不合理なるかに思わせるのは、単に数千年間因果的に考えきたった習慣的思考 **Denkgewohnheit** の結果である」と説明した。

「すでに習慣的思考が統計的法則性に由来する以上、要素的過程の絶対的因果性を支持するなんらの合理的根拠もない。むしろ、そのような因果性を統計性と同時に認めるのは自然過程を二重化するものであり、それが可能であるとしても経験を超えた主張であるから、挙証の責任は絶対的因果性を疑う者にでなく弁護する者の側にある」とした。[25]

シュレーディンガーは「エネルギー則が要素的個別的な過程では成立しないことも考えうるとし、仮にエネルギー則[6]と運動量則が成り立つとしてもそれだけでは四つの方程式が与えられるだけでいまだ多くの不決定を残す」と注意している。[26]

この思想がボーア―クラマース―スレイターの説に面して拍車をかけられたことはすでに述べたとおりである。のちに**J・v**・ノイマンは因果性の数学的否定の証明と関連してシュレーディンガ

ーを引照しているが、両者のこの問題に対する解釈の類縁性はここにもうかがわれる。[27]

この後間もなく、量子および波動力学の誕生とその解釈の発展にともない、とくにボルンの確率波の思想は因果性の問題に決定的影響を与えた。ボルン自身もこの点に注意をうながしたことは上述のとおりであるが、マトリックス力学建設に際しての彼の協力者パスクワアル・ヨルダンは「近代物理学における因果性と統計[28]」と題する小論文で、「因果性の存立は物理学的法則一般の存立と同意義ではない。自然法則は物理的場を支配する微分方程式であるが、因果性それ自身は一つの自然法則ではなく、ある時間的に離れた世界領域内の物理的依存性を言い表わすものとして自然法則からの数学的帰結、すなわち、双曲的微分方程式の数学的理論を自然法則に適用して得られる命題にすぎぬ」と論じ、「量子力学では古典的場の理論と異なり、この数学的条件が満足されぬから因果性は成立しない」と断定した。彼によれば「量子力学では、現在すべての確率を計算できるが、なおそれを理解したとは言われない。われわれが今後なすべきことは、すべての確率を独立な基本確率 Elementarwahrscheinlichkeiten へ帰着せしめてあたかも賽の六つの面が等しい確率をもつように『自然のなすことになんらの規則もなく、一をなすも他をなすもともに可能で両者の確率は等しい』という単純なところまで突き止めることだ」という。[29] この「自然が偶然におこなう決定 Entscheidung」への還元を理想とする多分に素朴な偶然論がどの程度まで量子力学と必然的な関連をもつかは、後章で詳細に説明することにして、われわれは今少しくボルンによる波動函数の確率的解釈を検討してみよう。[30]

上述のボルン、ヨルダンらの確率的解釈のなかには、波動を単に確率とする反面に物質の基本構成部分自体はやはり一種の粒子であるとする見方が[7]潜められてはいないであろうか。このような可能性はすでに光量子仮説でも考えられたことである。しかし光量子論の場合には、粒子説を固執するかぎり、幾多の解決しがたい矛盾が起こってくることはすでに見たとおりである。物質粒子の場合にはどうであろうか。

無批判的に粒子的表象を取り入れる「あまりにも図式的 schematisch な統計的解釈」は、次のごとき難問に逢着せざるをえない。

そもそも、ハイゼンベルク、ボルン、ヨルダンの量子力学創唱の方法論の精神は、電子の運動の位相のごとく観測不可能な量の導入を拒けることを一つの特徴とした。しかるにたとえ確率的に支配されるにせよ、粒子像を保存することは結局「電子の位相」のごとき概念に帰るものであり、観測不可能とはまったく主観的な不可知以上のものでなくなってしまう。その結果、熱力学の法則を古典力学からの偏倚として説明せざるをえなくなる。これは明らかに出発点の精神と撞着するものと言わねばならない。[31]

一方において、粒子像を物質の基本的要素に予想することは、統計力学においてなにゆえボルツマンの数え方が成り立たず、[8]古典的粒子像とは相容れぬボースやフェルミの数え方が経験と一致するかを理解することを困難にするであろう。[32]

さらにボーアーハイゼンベルクが指摘したように、水素原子の核のクーロン場にある電子は、もしE_nなるエネルギーの状態にあるとすればこれは負の値であり、核から $r=\frac{e^2}{|E_n|}$ なる最大距離以

上にはありえない。しからざれば、その運動エネルギーが負になるからである。ところが、確率密度$\Psi^*\Psi$は十分遠くでもなお、有限の値を有する。これは明らかに矛盾である。また、密度が時間とともに変わらぬ定常状態では、双極子のおのおのはその両極間に働く力が存在するにもかかわらずスタティックでなければならぬ。これも不合理である。(33)

このように粒子像を予想する波動函数の統計的解釈はふたたび新しき矛盾に直面するものであり、今日なお広く普及している確率波の法則で導かれる粒子という観念は、波堆をもって置き換えるシュレーディンガーの観念と同様にきわめて obscure〔曖昧〕な内容しかもたない。すなわち、われわれは波動函数の平方をもって「アン・ジヒ」な粒子の確率分布とは解釈できず、古典的気体運動論で単純に古典力学の法則を否定して得られるような統計的見方により、因果性の単なる否定としての偶然性を量子力学に当てはめることは、正しいものとは考えないのである。

(1) これは多くの物理学者が超越代数よりも解析に習熟していたという理由から説明される。
(2) *Naturwiss.* 14, S. 664 (1926) エディントンの *The nature of the physical world* p. 211 以下にかなり詳しい通俗的紹介がある。
(3) Schrödinger, *Abhandlungen zur Wellenmechanik, Inhaltsangabe* VI
(4) M. Born, *ZS. f. Phys.* 40, S. 169
(5) *Ann. d. Phys.* 79, S. 375 (1926)
(6) *Ann. d. Phys.* 81, S. 139 (1926)
(7) *Naturwiss*, 14, S. 664 (1926)
(8) ZS. f. Phys. 45, S.445 (1927)
(9) ZS. f. *Phys.* 45, S.184 (1927) 以上全体に対して H. Hönl u. C. Eckart, *Phys. Zeitschr.* 61, S. 89—

119, s. 145〜615 (1930) の綜合報告のとくにⅣおよびⅤ参照。

(10) 再度量子化 zweite [Quantelung の方法によれば、そのパラメーターは通常の数 x、y、z、t となるが、Ψは粒子数とともにマトリックスとなる。Pauli. *P. W.* S. 198; Jordan. *A. QT.* S. 228

(11) Schrödinger, *Wave Machanics*, § 1. 1928

(12) Eddington, *The nature of the physical world*, *p.* 211 シュレーディンガーの波動は物理的空間には存せず configuration space に存するのであるから、彼の wave mechanics〔波動力学〕は「not a physical theory but a dodge〔物理の理論ではなくて、ただの言いのがれ〕」と例によって奇矯な評を飛ばせている（二一九頁）。

(13) Jordan, *A. QT.* S. 160

(14) *ZS f. Phys.* 78, S. 555 (1932) 科学３、三八九、四二五ページに犬井鉄郎氏の紹介あり。

(15) *ZS. f. Phys.* 80, S. 573 (1933) および Pauli, *P. W.* S. 91 なお E. C. Kemble, *The fundamental principles of q. m.* p. 34 には Frenkel の注意とあるがおそらくオリジナルはパウリであろう。

(16) *Kemmer, Proc. Roy. Soc.* 166

(17) Heisenberg. *P. QT.* S. 39

(18) E. Feenberg. *The Scattering of slow electrons in neutral atoms*, Thesis. Harvard Univ. 1933 (*Kemble, The fundamental principles of quantum mechanics*, (1937) p.71 による)

(19) *ZS. f. Phys* 37, S. 863 (1926) に「衝突現象の量子力学」と題して予告的な報告があり、38, S. 803 (1926) で同じ表題で詳細に論じられた。なお量子力学における断熱原理を論じた〔既出 (4)〕 *ZS. f. Phys.* 40, S.169 (1926) においてもシュレーディンガーを批判しつつ統計的解釈が再論されている。

(20) G, Gamow, *ZS. f. Phys.* 51, S. 204 (1928) etc, E. U. Condon & R. W. Gurney, *Nature*.122, p. 439 (1928) etc.

(21) 一九〇五年以来アインシュタインは今日に至るまで粒子派である。C. G. Darwin, *The new conception of matter* (1931) は *Science* に掲載された講演を材料とするよき通俗書であるが、この問題を興味深く取り扱っている。たとえば波動は時とともに拡がるのでもしそれが実在ならば地質学的に見出される莫大な年月を経た化石は拡がっているべきに事実はこれと反すという類である。L. de Broglie, *Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire* (1930)（渡辺慧氏訳・波動力学）もこの種の思考実験に触れている。

(22) ここでボルンは「熱力学的－統計的基礎概念の修正」を期待しているが、これは同じゲッティンゲンにいた数学者

J. v. ノイマンによって間もなく実現された。

(23) *Naturwiss.* 6, S. 253 (1918)

(24) *Naturwiss.* 17, S. 9 (1929)

(25) このような説明はヒュームの習慣説のほか、主意的な立場の哲学者やニーチェやプラグマティストのあいだにも見られる。

(26) シュレーディンガーはこのような思想を O. W. Richardson, *The electron theory of matter*, 2nd ed. p. 507 (1916) およびとくに F. Exner, *Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften*, S. 645—702 (1919) から影響されるところが多かったようで、たびたび引用している。

(27) J. v. Neumann. *Math. Grund. d. Q. M.* R・v・ミーゼスらの初期の見解も例外でない。

(28) *Naturwiss.* 15, S. 105 (1927) および Born, *Naturwiss.* 15, S. 238 (1927) も Mechanik〔力学〕と Statistik〔統計学〕の融合を説いて同様の立場を表明した。

(29) Jordan, *Naturwiss.* 15, S. 105 (1927)

(30) 一方においてボルンの見解は、「多数原子についての統計的〔解釈〕のみが意味がある、Mikro-Koordinaten〔微視的な座標変数〕は測れぬ」としたが、これはシュレーディンガー－エクスナー流の段階であって、ウィルソン霧函等の実験に徴してもかかる言い方は適当でない。Born, *Naturwiss.* 15, S. 238 (1927), cf. M. Strauss, *Erkenntnis* 6, S. 90 (1936)

(31) シュレーディンガーはボルンらの統計的解釈を批評して、「原子の古典的な像に基づくエネルギーとか運動量のごとき量を測定するということは、その基づく像が明らかに誤っていることが知れているのに、なおそれに基づいて測定を解釈するのは、いささか大胆にすぎはしまいか」と言っている。ロンドンでの講演 Wave mechanics (1928) の終りでこれについて述べている。

(32) P. Langevin, La notion de corpuscules et d'atoms, *Actualitlés Scientifiques et Industrielles*, Nr. 132 (1934) p. 36. は独得の客観主義的唯物論的見地からではあるが同様の意見を示している。

(33) Heisenberg, *P. QT.* S. 25 以下、および A. Landé, *Principles of quantum mechanics* (1937) p. 5 参照。これに反し、シュレーディンガーの密度が遠方で有限な事実を電子は古典的には到りえない箇所へも量子論的には行きうると解する H. Dänzer, *Grundlagen der Quantenmechanik* (1935) S. 30 等はあまりにも素朴に陥っている。

〔1〕選集版では「……この基本的な様に沿つて居る」。
〔2〕選集版では「……の解釋の體で……」。
〔3〕選集版では「……それ自身を決定する」。
〔4〕選集版では「古典論的な不自然な不連續性を……」。
〔5〕選集版では「……，R. v. Mises 等の統計的研究家或は……」。
〔6〕選集版では「假にエネルギー則を……」。
〔7〕選集版では「……見方を潛めてはゐない……」。
〔8〕選集版では「……理解することが困難になる……」。

§ 13　変換理論より不確定性原理へ

ボルンが最初に波動力学に統計的解釈を試みた際には彼の定式化は次のごときものであった。「任意の函数Ψを状態の固有函数Ψ^nで

$$\Psi=\sum_n c_n(t)\Psi_n$$

の形に展開した場合、$|c_n(t)|^2$ は、与えられた時間に原子系がn番目の定常状態にある確率である」と〔既出 *Zs. f. Phys.*, 38, S. 803 (1926)〕。

そのかぎり、今日から見れば彼の統計的解釈はきわめて局限された内容しかもたなかったのであるが、ついでパウリは波動函数 $\Psi_n(q)$ そのものにも確率論的な解釈を試み、$|\Psi_n(q)|^2dq$ をもって、系がn番目の状態にあるとき、座標qがqと$q+dq$とのあいだの値を通る確率とし、一般にq、βを二つの量子力学的量とするとき、βがβ_0なる値を有することが知れていれば、qがq_0、q_0+dq間の値をとる確率は、

$$|\Psi(q_0, \beta_0)|^2dq$$

で与えられるというイデーを提出した。[1]

このパウリのイデーを一般化し、量子力学の基準変換の理論として発展させたのはP・ヨルダンであった。すなわち、$\Psi(Q_0, q_0)$ が前述のごとき意味を有する確率振幅ならば、

$$\Psi(Q_0, \beta_0) = \int \Psi(Q_0, q)\Psi(q, \beta_0)dq$$

なる変換函数は、与えられたβ_0におけるQ_0の振幅であるポスチュラートを構成し、「通常の確率計算の結合法則にしたがうものが確率自身ではなくて、その振幅である」ことに注目して量子力学における確率の「干渉」と称した。同じころ、F・ロンドンは変換理論を無限次元ヒルベルト空間における座標系の回転として取り扱った[2]。

この当時、ハイゼンベルクはコペンハーゲンのボーアのところで「量子力学における多体問題と共鳴」の研究をしていたが、これに関連し、不連続論の立場から「量子力学と揺動 Schwankung 現象[3]」なる論文をものし、そのなかで理論と実験とのあいだに新しい接触点を見出した。共鳴している二つの原子系、すなわち一方から他方へ、およびその逆に、エネルギーが脈動している場合を考えると、系のエネルギーを表わすマトリックスの対角線要素でその時間的平均が得られると仮定するのである。ハイゼンベルクは「計算された時間的平均値は、このエネルギーが一方の量子化された値から他へ不連続的に変じる（もちろんこの転移の時についてはなんら知ることはできないのである）という仮定から期待されるところとまさしく一致する」ことを証明した。

ディラックはハイゼンベルクとともにコペンハーゲンにいたが、上記論文の内容を発表に先立って知りえ、この結果は広く拡張しうるものと考え、任意の力学変数の時間的平均値の問題へ進んで変換理論に到達した[4]。これはディラック自身が、その変換理論を論述し量子力学を一応完結せしめ

た「量子力学の物理的解釈」なる論文の冒頭で述べたところであるが、われわれとしてはむしろハイゼンベルクが上記の研究において摂動論の方法を用いたことに興味ある示唆を見る。原（ママ）の擾乱を受けていない系 $H=H_0$ が α なる状態にあったとして、（衝突や突然の擾乱等の）摂動 λH_1 が突然插入された場合、β なる状態に見出される確率は、w なるエネルギーの函数の時間的平均値 $f(w)=\sum_{\beta}|S_{\alpha\beta}|^2 f(w_\beta)$ の係数を定める変換 $f'=s^{-1}fs$ の要素 $|S_{\alpha\beta}|^2$ で与えられるとした点に変換理論との深き関連を見出すとともに、測定の際の擾乱と測定値の統計的分布という、のちの重要なる解釈問題の萌芽をも認めるのである。

ディラック－ヨルダンの変換理論については、のちの測定の問題を論じる際により完全な物理的解釈を述べることにするが、ディラックが「量子化されていない」連続的な固有値のスペクトラムの問題へ一般化するために上記論文で δ－函数なる数学的にはきわめて不自然的ないわゆる「improper function」を記号的に導入して位置や運動量のごとき連続量をも変換理論に包摂したことは注目すべきで、この δ－函数を避けるためにJ・v・ノイマンがヒルベルト空間の抽象化を試み、不連続論と連続論との融合を数学的に完成したことはのちに触れよう。われわれは、ディラックもヨルダンも「座標 q に一定値を与えれば運動量 p のすべての可能な値は等確率である」と述べたことが、次に来るハイゼンベルクの不確定原理に示唆するところがあったのではないかという推測を付加しておこう。

ディラックおよびヨルダンの変換理論こそは、量子論において、一般的に古典論に用いられた概念を合理的に使用することを可能ならしめたものであり、ついで述べんとするハイゼンベルクの

不確定性関係の〔も?〕formal〔形式的〕には、量子力学の理論体系における Transformationstheorie〔変換理論〕の核心の[1]派生せる関係にほかならない。

ハイゼンベルクが量子力学建設の第一歩において、ひとまず古典的なモデルを放棄して実験的に与えられた数〔量の誤りか?〕のあいだの関係を導くことを目標としたことはすでに§10で述べたところであるが、彼がその際取り扱ったのは、のちにボーアの批評にもあるとおり、光学的な、時間空間的な記述や観測の問題が前面にあらわれないような問題であった。[5] そこで、衝突問題等を例にとって、シュレーディンガーのマトリックス力学の抽象性の批判〔するもの〕も出たのであった。

それにもかかわらずハイゼンベルクの、直観性を放棄した「数学的形式は日常の感覚的表象からとりきたった直観的モデルを基にする必要はない」という否定の意義はどこまでも尊重されねばならぬ。その後の発展はますますこの方向へと転化するのである。それは今後といえども変わらないであろう。だがじつにそのゆえにこそわれわれは、その抽象的形式の解釈、結局においてはわれわれの知覚に媒介される実験結果との関係を問い、真摯な考究の対象としてその抽象的形式が単に机上の数学的遊戯に終わらぬために、物理的意義を問う必要が生じる。それは通俗的解説というごときものとは本質的にその使命を異にする。それは exakt〔正確〕ではないが streng〔厳格〕な点において劣らない。またこれによって、まえの否定がくつがえされるのではない。否定の契機はどこまでも以下の直観的内容の一面として働いておらねばならない。

しかし、ハイゼンベルク自身が研究をつんだボーアを中心とする学派の、いわゆる「Kopenhagen Geist〔コペンハーゲン精神〕」は本来、理論が単なる数学的形式に堕することを戒めて、どこまでも

その物理的意義を重んずるものであって、直観的把握を軽視するはずはないのである。「物理学的理論は、この理論の実験的結果をあらゆる簡単な場合に質的 qualitativ に考え得、同時にこの理論の適用がけっして内部矛盾を含まぬことが認識された場合にこれを直観的に理解したものと信ずる。[6]」

一九二七年の春、ハイゼンベルクはコペンハーゲンにおいて、かく冒頭しつつ、「量子論的運動学および力学の直観的内容について」画期的な解釈を展開した〔*ZS. f. Phys.* 43, S. 172 (1927)〕。

「量子論を直観的に解釈しようとする試みは従来しばしばおこなわれたが、いずれも内部矛盾に充たされたものであり、不連続論と連続論、粒子論と波動論の対立となってあらわれていた」。しかしかつて相対性理論のもたらした認識論的反省はこのたびもきわめて教訓的である。われわれが日常習慣的に用いる直観的な時間・空間や運動の概念が直接の経験を超えた巨大な世界や極微の領域で成り立つかいなかは「われわれの思惟法則からも（日常の）経験からも推論することができない。」すでに量子力学の出発点が古典力学の extrapolation〔補外〕に対する批判[7]であり、日常の運動学的概念からの訣別ではなかったか。

「量子論的領域においても、空間時間の幾何学は、相対論的影響を度外視しうるかぎり、ただちに修正の必要はないかも知れぬ。これに反し、運動学的・力学的な関係は、量子力学の根本要請たる $pq-qp=\frac{h}{2\pi i}$ が質量、位置、速度のあいだに成り立つ点から見ても疑問をいだかしめる理由が十分にある。微小領域ではなんらかの意味で不連続性が特徴をなすことを認めれば、そこでは「位置」や「速度」の概念が修正を要することは plausibel〔考えうること〕である。たとえば質点の一次元の運動を考えるに、連続論では粒子の軌道として径路の曲線 $x(t)$ を描き、その正切が速度を

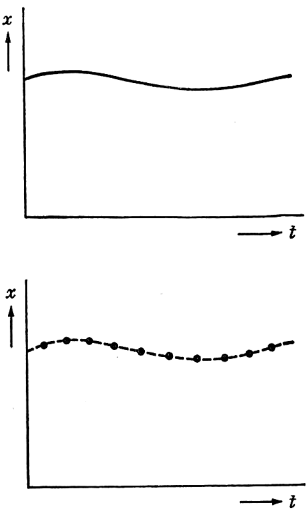


図 1（上），図 2

表わす（図1）」。この「速度」は十七世紀以来、古典運動学のきわめて成功的な極限概念に基づくドグマであった。いな、すでに古代においてかの有名なエレアのゼノンの運動否定論を反駁したアリストテレス以来の、連続性に基づくドグマであった。「これに対して不連続論では一列の点が有限の間隔であらわれる（図2）。この場合には一定の位置での速度を云々（うんぬん）することは明らかに無意味である。なぜならばこの場合には速度は二つの位置を借りて決定され、その結果、各点には二つの異なる速度が相応することになるからである」[8]。

そこで、これらの運動学的・力学的な概念を厳密に検討し、この概念の有効な範囲と限界を明らかにして、従来量子論の直観的解釈に免れなかった矛盾を解明するという――カント的な意味で批判 Kritik というにふさわしい――課題が生じる。ハイゼンベルクはいかにしてこの困難な課題を解決するであろうか[9]。

ある物体、たとえば電子の「位置」という言葉によって何を理解すべきかを闡明するには**「電子の位置を測定するための一定の実験を挙げねばならない。しからざればこの言葉は何の意義ももたない」**。

この見地こそハイゼンベルクの解釈の根幹をなす中心思想であり、ひいては量子力学いな科学一

般の実証的精神、むしろ適切には operational definition〔操作的な定義〕を表現するものと言えよう。

これはまた、アインシュタインが相対性理論の出発点にあたって「同時性」の概念を定義するために（思考上の）物理的経験を必要としたのと軌を一にしている。[10] 曰く「物理学者にとっては、概念というものはその概念が当たっているか否かを具体的な場合に見出す可能性が与えられて初めて存在する」。すなわち、同時刻という概念の定義は、二つの具体的な事象が同時に起こったか否かを「実験によって決定する方法を与える」ような定義でなければならない。「この要求が満足されぬかぎり、同時刻ということに何らかの意味を結びつけうると信じるならば物理学者として（物理学者でなくとも！）自ら欺くものである」。[11] この定義のために光信号が提出されたことは周知のとおりである。

電子の位置を測る実験として、原理上の問題であるから思考実験で差支えないので、顕微鏡で直接位置を見るという意味で、ハイゼンベルクは有名なγ線顕微鏡なるものを例にとった。位置を正確に測定するには照射する光の波長が短いほどよい。しかしこの際一つの副作用 Nebenumstand があることを見のがしてはならぬ。すなわち電子はγ線で照射された瞬間、コンプトン効果をこうむってその運動量を不連続的に変じ、この変化は波長が短いほど大で、結局コンプトン効果の公式から位置qおよび運動量pを同時に測定する際の両者の誤差は

$$\Delta p \Delta q \sim h$$

となる。これが最初の彼の推論であって、ここでは測定の際に避けられない観測手段と対象との交

互作用すなわちコンプトン効果が、このいわゆる不確定性関係[12]の原因であるかのごとく説かれた。これは今日なお誤解している人もあるので、この点と一般に不確定関係が量子力学にとっていかなる意義をもつかという問題との検討はのちに譲ることにする。

次に「電子の軌道」を取り上げてみるに、これは測定によって確かめられた一系列の点と考えるほかはない。**「軌道はわれわれがそれを測定することによってはじめて成立する。」**この見地からすれば水素原子の「1s軌道」のごときはなんらの意味ももたない。なぜならばこの「1s軌道」を測るには少なくとも軌道の径 10^{-8}cm よりかなり短い波長の光で原子を照射しなければならないが、そのような光の一つの光量子といえども電子をその「軌道」から叩き出すに違いないからである。これでは空間内の一点が決定されるだけであるから、このような場合に「軌道」という言葉がなんらの理解しうべき意味ももたないことは、新しい理論をまつまでもなく単に実験的可能性からでも推定ができるのである。原子内電子の「軌道」ということが多少とも物理的意味をもつのは、それがそうとう高い励起状態で確率波堆を帰することができるような場合に限る。

自由電子の場合にはダーウィンとケンナードが計算したように、波堆の運動として記述できるが、この波堆ははじめ原条件の不確定性により時とともに空間的に拡がってゆくが、観測を繰り返せばふたたび元のような波堆となる。この観測を頻繁におこなって追跡する精度の範囲内でのみ古典的運動方程式も有効なのである。

同様のことは、速度やエネルギーの測定についてもいえる。結局「古典理論で力学系の記述に使

用されるすべての概念は、原子的過程に対しても、古典概念とアナローグに正確に定義できるが、この定義に用いる実験は、もし同時に基準共軛な量を決定しようとすると独特の不確定性を担わざるをえないのである」。

これを要するにハイゼンベルクが論究の冒頭に掲げた「古典力学的概念の適用性はわれわれの（アプリオリな）思惟法則からも（日常の）経験からも結論しえない」という主張は、$\Delta p \Delta q \sim h$ なる不確定関係の発見によって裏書きされた。しかし一方では思考実験によって示されたように、われわれは理論の実験的帰結をすべての簡単な場合に質的 qualitativ に把握しうるのであるから、もはや量子力学が非直観的で抽象的だという非難は当たらない。かく実験的な状況さえ直観的に把握できれば、量的法則を導くためにすべての量子論的量は「実際は in Wirklichkeit」マトリックスであると言っても格別の困難は起こらないであろう。

われわれは、ハイゼンベルクがこの論文で幾多の思考実験やディラック－ヨルダンの変換理論の解釈、シュレーディンガー波動論の批評を試みているのをいちいち紹介しえないが、彼がその末段に付け加えたつぎの一節は学界に論争の波紋を起こしたものである。

「量子力学が古典力学に対立して本質的に統計的な理論であると言うのは、精確に与えられた材料（データ）から単に統計的な結論しか下しえないというのではない。かく言うことは、例のコンプトン効果に関連するガイガー－ボーテの有名な実験にも反する」。

「もし現在を精確に知れば未来を計算できるという命題は、結論〔が間違っているの〕ではなくて、前提が間違っている。あらゆる規定要素について現在を知ることは原理的に不可能である」。

「そこで、すべての知覚は多数の可能性からの一つの選択であり、未来に可能なるものの一つの制限にすぎない。ところで量子論の統計的性格は、すべての知覚が不精確なこととときわめて密接な関係があるので、人あるいは知覚された統計的な世界の背後になお『真実の世界が隠れていて、そこでは因果律が成り立つのではないか』という（のちにプランクらが主張した）憶測に誘われるかも知れない。しかしかような Spekulation〔思弁〕は不生産的であり無意味である unfruchtbar und sinnlos ことをとくに強調する。物理学は単に知覚の連関のみを形式的に記述すべきである Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben。おそらく次のごとく言えば真の事態ははるかに適切に表わされるであろう。すべての実験が量子力学の諸法則と、したがってまた不確定性関係に支配される以上、量子力学によって因果律の不成立は決定的に確立される so wird durch die Quanten die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt」と。

ハイゼンベルクはこの論文の後書きにおいて、「彼の所論はボーアによって本質的に深められたが、その結果、彼の行論に本質的な見落としがあったことも明らかになった。すなわち観測における不確定性はまったく不連続性のみから生じるのではなく、むしろ粒子論と波動論との対立にあらわれるような異種の経験を同時に正しく表わそうとする要求と直接に結びついている。たとえばγ線顕微鏡の場合にも、光束が必然的に拡がることを考慮に入れなければならぬ。その結果コンプトン反跳の方向が正確に知れなくなってはじめて不確定性関係が導かれるのである」〔と述べた〕。

このハイゼンベルクの論文の後書きの一節は、不確定性関係を導く思考実験の解釈上きわめて重要な注意を意味するものであるが、それはこの文章のみでは簡単にすぎて十分了解しがたかったの

であろう、ほとんどすべての批評家から無視されてしまった。われわれはその意義をボーアの研究によって闡明するまえに、まず不確定性原理およびその帰結[2]と考えられる因果律廃棄に関連して各方面から発せられた批評を概観してみよう。

（1） P. Jordan, *ZS. f. Phys.* 40, S.809 による。
（2） *ZS. f. Phys.* 40, S.501 (1926)
（3） *ZS. f. Phys.* 40, S.501 (1926)
（4） ディラックの *q*-number の理論はこの変換理論とあいまってはじめて stationary state にしたがって配列したマトリックスの制限から解放し、ここにはじめてシュレーディンガーの波動力学の全内容は量子力学の完結した体系の内に止揚されてしまうことになった。
（5） Bohr. *AT. NB.* S. 47
（6） ここにヘーゲルのいわゆる、本質論の段階から概念の自覚、概念論への移りが遂行されねばならぬ。
（7） すなわち十分大きな質量を想定すれば、量子力学における幾何学的諸関係は古典力学におけるそれへ任意に近似せしめうる。
（8） シュレーディンガーも同様の事態を指摘している。〔*Über Indeterminismus in der Physik*, S.17 f (1932)〕
（9） ハイゼンベルクはこのさい「ボーアの研究（たとえば *ZS. f. Phys.* 13, S.117. 1923、アインシュタインの波動場と光量子との関係の議論、パウリの *Handbnch d. Phys.* XXIII の Quantentheorie (1926) に負うところがあり、とくにパウリの著書は量子力学の出現によっても本質的にはあまり変更を要せず、当面の問題も部分的には解答されており、彼との談論、通信に得るところ多かった」と述べている。
（10） *Ann. d. Phys.* 17, 〔S.579〕 (1905) Zur Elektrodynamik bewegter Körper §1
（11） Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, S.14. (1921) 桑木、池田訳、相対性原理講座三一頁。
（12） この論文の本文では不確定性関係の正確な演繹はない。不確定性関係をハイゼンベルクは最初単に Ungenauigkeit とか Unbestimmtheit とか Unsicherheitsrelation と呼んだが、のちに Unbestimmtheitsrelation とした。
〔1〕 選集版では「……Transformationstheorie が核心の……」。
〔2〕 選集版では「……及びその帰結を……」。

§14 ハイゼンベルク思考実験の批評[1]〔因果律廃棄をめぐる論究〕

測定による擾乱が以上の〔むしろ次の§15に紹介する〕ボーアの演繹で表面にあらわれていない事情は、ハイゼンベルクの不確定関係の導来に対する批評の一契機ともなった。もちろんハイゼンベルクの推論のうちに直接数学的・物理的な誤謬があると言うものはない。それらの批評は人々の立場により、種々雑多であって、それを一定の方針で整理することすら困難である。しかしながら強いてこれを分かつならば、不確定関係とその因果性問題とがあわせて論議された場合が少なくないので、それから述べてみよう。

前述のごとくハイゼンベルクは不確定関係の結果として因果法則の不成立を主張したので、これは保守的・古典的な学者のあいだに多くの反対を喚び起こしたのである。プランク、アインシュタイン、ラウエ、シュタルク、レーナルトのごとき人々は多少ともこの傾向に属するのである。

マックス・プランクは[2]古く一九一四年におこなった講演「力学的および統計的法則性」のなかで、物理学は絶対的法則性を欠きえないと述べて、つづいて「確率の大小あるのみで絶対的必然性の概念を棄て、自然には力学的法則はなく単に統計的法則のみだと主張したりする」ことを宿命的近視

的な迷誤として拒けた。なぜならば、そのような主張をすることによってまさに統計学の推論そのものがその最も重要な根拠を失うからだというのが彼の論法であった（*Phys. Rundblicke S.* 92）。しかしてかような信念はのちの著作『実証主義と実在的外部世界』[1]のなかでも、自由意志問題と対照せしめつつあり（ママ）、詳細に説明されている。かかる彼の立場からすると、不確定原理はまったく色彩を異にする脚光のもとに照らし出されざるをえない。彼によれば、実証主義の根本的誤謬は、それが単に測定結果のみを顧慮して実在的な過程を一般化し、無視する点にある。

　作用量子の存在の結果として、最高の精度を有する測定法をもってしても、なお数値的に明示される限界をおかれ（ママ）、まさにこの点において、これを越えて実在的な過程の個別的事情を知ることは不可能であるが、物理的世界像を能うかぎり完成し、これによって実在世界の認識に一歩を進めるためには、測定の結果が自由なる思索によって補足されなければならない。

　実証主義的見解では、測定結果は一次的な不可分の要素であって、全科学はその上に建設されると言うが、これに反して現実の物理学では、測定は外部世界の出来事〔と〕、測定器械ないし感覚器官における出来事との交互作用の多少とも複雑に合成された結果と見なされ、その解決と説明がまた科学の一つの重要な課題である。

『物理学における因果概念』においては、「不確定原理によって因果性を否定する不決定論者は、世界像を感覚世界と取り違えたものであり、少なくとも彼らの結論は早まっている」とされる。プランクの指示する難関脱出の道は、質点の位置と運動量の値を同時に問うことはまったく物理的意味をもたないと仮定することである。「無意味な問いに答えを与ええないとしてもそれはなんら因

果律の重荷とはならぬ。反対に量子物理学の世界像は、作用量子をもってもなおかつ厳密なる決定論を遂行せんとする要求から生まれたものであり、これは、従来の世界像の原始成立たる質点が拒けられて、物質波が新世界像の要素となったことによっておこなわれる。これを表現する波動函数は、原始〔初期〕条件と境界条件により、すべての場所と時に対して完全に決定される。要するに、量子物理学においても古典物理学と同様に厳密に決定論が支配するのであるが、ただそこに用いられる記号と計算観測〔観測は規則の誤りか〕が異なるのみなのである。感覚世界の出来事の予言の不確実性は、世界像と感覚世界の連関の不確実性に帰着される」。プランクが年来の主張、人間的感覚性からの離脱は、ここにもその例証を見出すことになる。プランクは、波動函数そのものが確率分布を与えるにすぎないのではないかという不決定論者の主張に対して、「波動函数は特定の測定装置に対してはじめて一定の意味を有し、不決定は、少なくとも一部分は、用いられた測定器械の因果的作用によるもの」と答えている。ところでこの因果的作用を直接確かめるには、また新たなる因果的作用を要するため、これはまた問題へ新たな不確実性を持ち込むのではないか、かくては無限に逆行してはてしなく、かかる説明にはなんらの合理性も見られぬという不決定論者の主張に対しては、彼は一応譲歩して、「決定論と不決定論とがさらに自由に各自の立場を徹底することを奨める」が、不決定論者が確率的量で満足してさらに因果的に追求するのを非難し、「因果律が論理的に基礎づけられぬとしても、それを無価値とするのは誤りで、ガリレイ、ケプラー、ニュートンがいかに世界のハルモニイを目ざして努力したかを思えば、外部世界の実在性や因果律の理念は、正誤 Wahr oder falsch? Wertvoll oder wertlos?〔正か誤か、価値があるかないか〕を言うべきでなく、

科学的探究の heuristisch な〔つまり〕発見法的〔な〕原理、きわめて価値ある道しるべである」と結論している[2]〔文献（16）〕。彼の言説の基調はまことに彼自身の言葉のごとく、「die Begeisterung und die Ehrfurcht〔感銘と畏敬〕」である。われわれは、かかるプランクの結論や「最も豊かなる実をもつ世界観が最もよきもの」と説く彼の主張が、彼の「Anthropomorphismus 人間主義の排斥の客観主義」と首尾一貫したものかいなかに疑いをもつものであるが、ともかく量子論の創唱者であるプランクの古典的立場の典型的なるものとして顧るべきであろう。

かの相対性理論によって、万古不易と見られたニュートン力学の基礎をゆるがし、プランクと雁行して量子論建設時代の双璧たりしアルベルト・アインシュタインのごときも、量子力学の解釈に対してはプランクと同じく古典的な立場を代表している。

彼が、特殊相対性理論の出発時において、一見自明の概念である「同時性」の概念をとりあげて、「これが物理学的意義を得るためには、それを決定する物理的方法が指定されねばならぬ」としたのは、今日のボーアやハイゼンベルクの根本態度の先駆をなすものであったが、近年のアインシュタインはとくに数学的演繹的に傾いている。「もちろん、経験は数学的構成の物理的有用性の唯一つの試金石ではある。しかし創造的原理は数学のうちに宿る。」純粋思惟の所産としての数学と実在との予定調和が（ママ）「自然は最も簡単な数学的概念の実現である」というのが近年の彼の言葉である[3]。

アインシュタインは「ハイゼンベルクの不確定性原理の結論として、将来の理論は粒子の絶対的な位置という考えは放棄すべきである」とするが、他方「ボルン以来の波動函数の統計的解釈は、

実在の間接的主観的記載であって、客観的直接性を欠くがゆえに、かかる解釈に対しては過渡的な意義しか認めえない。物理学者は長いあいだには、これに満足しえなくなるであろう」という見解を述べている。彼のいわゆる「実在の模型」は、「単に事象の生起の確率を与える事象自体を表わす理論」、すなわち、特異点なく、偏微分方程式を満足せしむる場の理論である。この連続理論において電子的諸特性は、原子的構造をなす粒子の位置を言うことなく積分法則として表現される。すなわち境界ではいたるところ電気密度が零になる三次元の空間の一部分がつねに全部の荷電を含み、その大きさは整数であらわされればよいという見解である。アインシュタインはウィルソン霧函の実験を例として、電子回折の個別的記述は可能性があり、少なくとも統計学が出発点としては不適当なことは統計力学が力学への出発点とならぬごとくであると説く点は、[3]彼自身も告白するごとく、プランクの世界観と親近性があり、ローゼン、ポドルスキとの共同作「物理的実在の量子力学的記述は完全と考えうるか？[4]」という論文のごときも、量子力学へのかかる不満の一つの表われである。しかし、これについてはボーアの批評と合わせてのちに述べる。

マックス・V・ラウエも同様の立場にあり、「ある時代に測定不可能と考えられた量が、のちに至って測定された（たとえば電気力学における電磁波のごとき）例もあり、物理学の進歩はまさにかくのごとき新しき測定手段を見出す点にあるから、あまりに軽々しく不確定関係を物理学一般の最後の言葉と考えてはならぬ」と戒めている。[5]

そしてこれは、科学批評家フーゴー・ディングラーも強調する点である。彼は多年相対性理論の

反対者として活動しているが、ハイゼンベルクの不確定性原理が、俗人を驚かすべく通俗的に誇張されていることを指摘し、「その根本の誤謬は、つねに前進しつつある科学の道の途上の一点において得られた特殊的な概念を全物理学の真の基礎概念とせねばならぬ、またなしうるとする点にある。これはプランク以来、近年の理論の発展における一つの欠陥であり、ハイゼンベルク[4]はかかる方法論的考察を顧みず、あまりにも数学的な側面から問題を見る。彼は全物理学の形式を唯一の公式群から導かんとするMathematismus〔数学万能主義〕の弊に陥っている。これは聖母マリアの像の衣のひだ目を絶対人格の生産原理の自発性から規定しようとするヘーゲル的迷妄であり、認識になんらの加うるところもなく、この点、相対性理論やハイデガーの哲学のごときも同様である」と、右に左に酷評を下している〔文献（8）S.378〕。

「さらにハイゼンベルクはこれに加えて、所与を先入見なく取り上げることをせず、電子と陽子をいっさいとする原子的世界像を絶対視するTheoretismus〔理論万能主義〕の誤謬にも陥っている。十九世紀後半の唯物論は、力と質量の世界を絶対視したが、彼らはその世界観自身が思惟の所産たることを忘れたのである。科学の発展にともない、世界像もしだいに変遷し、ますます精微（ママ）に移ってゆく。それを現在最小のもの〔と見なされている粒子〕を絶対視して、哲学的結論を下すもの[5]は正しくない」というのがディングラーの結論である〔文献（8）S.379 f〕。

プランク、アインシュタインおよびラウエのごとく、今世紀の初頭において物理学の世界像に一大変革を遂行した巨星が、真摯な態度をもって、不確定関係から因果律否定を結論することに反対

しているのはなぜであろうか。これは彼らが物理的世界の客観的実在性の信念を固持しているという以外に、不確定関係がその専門的意義と領域を超えて不当に通俗化され歪曲された形でセンセーションをまき起こしていることに苦々しさを感じていることが明らかにうかがわれる。プランクは四十年も以前の口吻をそのまま、「今日の青年間に一般的な問題や世界観の獲得に対する関心がましつつあるのは喜ぶべきことであるが、その世界観が確固たる現実の地盤に建てられていないと〔すれば、それは〕空中楼閣であり、一度嵐が来ると救いがたく吹き倒されるであろう。ゆえに青年は一度は必ず事実の領域に謙虚なる研究をとげねばならぬ。哲学博士の学位を得るにはなんらかの専門科学で特殊知識を証明し、自分自身の研究によって、いかに科学的方法的に研究するかの概念を把握せねばならぬ」と述べている〔文献（2）S. 273〕。

アインシュタインもまた、「たとえばエディントンのごとき人が、その専門的研究においてはきわめて優秀な学者でありながら、その通俗的著作においてはあまりにも軽妙な多数の誇張と牽強付会を加えて、かえって世人を誤るものがある」と語って、客観的実在性の問題に関してはプランクと基調を一つにすることを告白している。

一方、エディントンは、上述のごときアインシュタインの古典的世界の固陋なることを評して、「その立場に立つようになってからのアインシュタインには積極的業績が見られない」のを歎いているが[6]、プランク、アインシュタインらの見解の当否は別として、彼らが軽佻浮薄なる通俗的流行概念を排して、真摯な研究的精神を鼓吹せんとする点ではこれを高く評価せねばならぬ。

電荷の位置のごとき古典概念が、原子物理学においては無意味であると主張して、不確定関係を無対象の、したがって無意義仮現の命題として評し去る人々がある。われわれはその最も有力な代表者としてシュレーディンガーの名を挙げることができるが、彼は Kausalität〔因果性〕を廃棄することには異論がないが、波動力学建設の当初直観性の重要なことを主張して「幾何学の法則」を擁護したのを思い合わせると、十年を経ずして「微小領域における幾何学の不可適用性について」[6]を論ぜる変遷に驚くのである。彼によれば、質点はその定義によって位置と速度、質量によって力学的に決定されたものである。位置と速度（運動量）の Angebbarkeit〔示しうること〕を拒否するのは、この質点の概念を廃棄する結果になる。[7] したがって質点の位置等の正確な決定法を諦めるのではなくて、むしろその概念自身を放棄すべきであって、漠然と不確定に定義された概念のごときは monströs（怪物的）である。そもそも位置、運動量のごとき共軛量の一方が知〔ら〕れた場合に他方はどうなっているのであるか、それは全然実在性をもたないのか、それとも単に知りえないのみか（後者の可能性は量子論では否定される）。シュレーディンガーはかく論じ、説明して言う。量子力学も、古典力学で考えられたようなモデルを用い、したがって古典的概念と同じ用語を便宜上使用しているが、じつは単に古典概念と名を同じくするのみで本質的に〔は〕新しい Merkmal-gruppe（一群の特徴的概念）を取り扱っているのである。言葉のはしをとらえれば、すべての発言は直観的モデルに関連しているようにも思われよう。しかし量子力学では、すべての価値ある発言はほとんど直観性を有せず、その直観的・Merkmal〔特徴概念〕的価値は僅少である。水素原子中の電子の時間 $t=0$ の位置から後の時間における位置統計に興味をもつ人間はない。かかるすべての

批評、その価値・無価値とはしだいに後章の発展において明らかとなるであろう。

　やや古典的な傾向の学者や、因果律をなんらかの形で擁護しようとする学者のうちには、不確定関係と因果律否定の間に関連が存在しないと論じる者が少なくない。たとえばH・ベルクマンの論法[7]は、ハイゼンベルクが「量子力学の立場から見て、AならばBであるという形の因果的表現は、Aという前提が falsch〔誤〕である」としたのを批評し「Aの不確定はA・B間の因果関係の廃棄を意味しない」というのである。ホェーニヒスバルトは「Kausalität は単なる仮定ではなく、プラトン的仮設であり、カテゴリーで、対象概念一般の規定のモメント〔なのであって〕、物理学が因果律を云々するのは *μετάβασις εἰς ἄλλο γένος*〔新しい別のことへの移行〕である。したがって過程を決定する不能から Umbestimmtheit〔不確定性〕を結論するのは不十分である、不確定性関係は、さしあたって現在の不十分な物理学的公式が自然〔現象〕の一義性を表現するのに不完全なことをあらわすのみである」とし、これに付け加えて、「観測による Störung〔擾乱〕によって観測対象が stören〔擾乱〕されるというが、これはすでに因果律を予想した概念ではないか」と指摘している。この観測による擾乱の概念と因果性の連関は何人も容易に気づくところであるから、したがってこの見地から量子力学は因果性を否定するものではないという多数の意見が発表されている。たとえば前記ホェーニヒスバルトのほか、E・メイ、M・ハルトマンその他を挙げうるし、このゆえに観測する者までを含めた全体については因果律は完結すると称し、流行の Ganzheit〔全体性〕の概念や complete system〔完結した系〕での因果性の成立を説く人々もある。H・ディングラーは「観測による Störung と言っても、自然が擾乱されるのではなく、全体としてはあるがままに

あり、擾乱されるのは学者が想定した図式にすぎない。ゆえにハイゼンベルクが電子の位置と速度を同時に測定しようという不可能な希望をいだくと、すべてが『擾乱』としてあらわれてくる。なぜなら、それは不可能なことだからである。それで彼の Störungstheorie〔摂動論〕は誤っている」と論じる。[8] これらの説の正誤はのちに明らかにするであろう。だが、いずれにしても、一般に現在の測定値から未来の測定値を一義的には算出できないということは、古典力学の場合とは著しい相違である。[9] しかしG・ヘルマン、E・メイ、M・ハルトマンらは、このような Vorausberechenbarkeit と Kausalität〔事前算出の可能性と因果性〕とは別のものであり、前者は過大な要求であって、これを混同するのは正しくないと言うのである。

これらとまったく異なった方向から不確定性原理へ批評を加えたのは、測定による擾乱という説明の不適切さを指摘するものである。たとえばフレンケルは、「これ——observer の interference 観測者による干渉——は、すでに古くから知られた概念で、なんら新物理学の独自性を示さない。かえってかかる擾乱によって測定の不可能性を証明せんとするは、その根本においては決定論的であって、かかる概念を基本物質粒子に適用することは、一般に信じられているごとく不決定論に導くのではなく、単に現象中に存する不決定性を暴露するものである。量子現象は (variation with time) 時間に対する不連続性、転移 transition (古典力学との相違)、飛躍 jump にその不決定論的特徴を有するのであって、その擾乱が度外視しうるかいなかの二、三の相異は重要でない」と評し、[10] 同じく「不確定関係の意義があまりにも誇張されている」と述べている。これに反し徹底的にその統計主義的方法論による不決定論の立場に立つリヒァルト・フォン・ミーゼスらの学者は、フレン

ケルと同じく、観測過程が対象に影響することは古くから知られていることでハイゼンベルクのγ線顕微鏡も「非決定的な、単に統計的にのみ把握さるべき過程たる」ことが重要であり、[11] この場合、測定される量に「真の値」が存すると考うべきではなく、したがって不確定関係も通常の意味の「誤差」の関係ではなく、すなわち、すべて座標と運動量の同時測定の誤差は少なくともhであるというのではなく、両観測系列の分散[8] Streuung の積が最小値hを有することを主張するものである。測定が統計集団 **Kollektiv** を形成するという立場を外にしては、なんらの分布も分散もありえず、したがってなんらの不確定関係もなくなるのである。[12] これがv・ミーゼスの立場であり、彼の著書『確率、統計および真理』の力説する思想もこれである。これは一見すると実証主義的に徹底したすこぶる新味のある立場と思われるかも知れない。それでわれわれものちにふたたびこれを批判する機会をもつであろう。

ハイゼンベルクの不確定性原理およびそれの帰結としての因果律の廃棄を、唯物論、決定論の克服という形で広く一般に普及したのは、ドイツのボルン、ヨルダン、英国ではA・エディントンであった。エディントンは新理論の内容をいちはやくとらえるとともに一流の才筆をもってその通俗的解説を試み、さらに認識論上の見解を説いた。しかしてここに多分にジャーナリスティックな風潮さえ生じたのである。他方では、例のウィーン学派の新実証主義者は、雑誌 *Erkenntnis* を発刊して、ますます彼らの立場の普及につとめ、古典的立場は形而上学的——sinnlos〔無意味〕として拒けられた。これらとともに因果性の問題をめぐる論争は、むしろそれらは事態の正しい解決としてよりは、問題提出、問題の視野を十分広汎に展開せんがためであった。それは年代的には一九

二九年ころから約十年間にわたっている。のちのボルンやハイゼンベルク自身の発展によってはあまり深く影響されなかったような諸々の見解を叙述してみよう。

われわれはすでに§10において物理学における実証主義に対してプランク、ラウエ、アインシュタインらが反対意見を開陳したことを述べたが、ハイゼンベルクの因果性廃棄の宣言に対してもまったく同様の、当時スモルコフスキらの成功によりようやく抬頭してきた因果性を確率へ帰着させる傾向に対して(§10)(§13)対立が表明された。プランクは古く一九一四年におこなった講演「力学的および統計的法則性」のなかでも、彼は統計的方法の重要性を認めつつも絶対的決定論の仮定があらゆる科学的研究の欠くべからざる基礎となることを主張した。「それがたまたま最初の言葉を語るものであっても最後の言葉を語るものではないということがその本質に存する」すなわち「統計的法則は、力学的法則とたがいに並んで置かるべきものではなく、統計的法則は複合したものであって、けっして決定的にこれにとどまることはできずに、さらにその簡単な力学的要素へ帰着させる問題がそれ自身に潜み含まれている」、「絶対的確実性ないしは不可能性を全然棄ててしまって、単に確率の大小の程度だけを許容しようとし」、「自然にはもはや力学的法則はまったくなくなって、単に統計学的法則のみが存在することとなり、絶対的必然性の概念は物理学ではまったく消失することになる」が、「かような見解は、不運かつ近視的な迷誤として見なければならない。なぜなら物理学は絶対的法則性の仮定を欠くことができないからである。ここに話された統計学の結論でさえも、これなしには本質的な基礎を失ってしまうからである」と述べている。

量子力学がもたらした因果性問題に対するプランクの見解も、この立場になんら本質的な変更は加えられず、ただ個々の問題の状況に応じてこれを適当に言い換えるにとどまったといっても差支えない。ハイゼンベルクの不確定性関係に当面してプランクは、これをもって厳密な因果性を放棄する十分なる理由と認めず、「むしろ物理的に不十分に formulieren〔定式化〕された問いには、いかに完全な物理学の理論もなんら一定の答を与えることができない。すなわち物理的世界像には人間的測定技術の Kunst〔業(わざ)〕と関連する概念を取り入れることはまったく拒(しりぞ)けねばならぬ。ハイゼンベルクの不確定性関係も測定とは無関係であり、すなわち、不確定性の理由は概念構成およびこれと関連した問題提起の欠陥に存する」[13]とする。「新世界像のエレメントは、感覚界からとりきたった物理的粒子ではなく、高次座標空間内の物質波であるが、有限な大きさのこの簡単な周期的波動の重畳によっては一定の運動量を有する一定の点を定義することはできないという数学的命題の結果であって、この物質波自身はそれぞれの問題に相当する数学的境界値問題によって一義的に決定されるから、不決定論にはなんらの関係もない[14]。感覚的世界の出来事の予言が不可能という不決定論が生ずるのは、粒子力学からきた問題の立て方によるのであって、物理的世界像それ自身ではなく、世界像とあまりにも人間的に色づけられた感覚的世界〔と〕の関連が量子力学によって gelockert〔ルーズなものに〕されたのみである[15]」。「量子物理学においても古典的物理学と同様に厳密な決定論が支配するのであるが、ただそこに用いられる記号と計算規則が異なるのみである[16]」。「世界像には、直接観測しうる量でなく、感覚的世界に対して単にきわめて間接な、もしくはなんらの意義を有せぬ記号が現われる〔が、それという〕のも、厳密な決定論を遂行せんがためである[17]」。

プランクをして言わしめれば、不確定性関係が(ママ)、「測定さるべき過程への測定器械の因果的作用侵入がおこなわれる(ママ)」、「測定過程が実存(ママ)的過程について報告するのはそれが因果的になんらかの関連を有するときであり[18]」これによって実在過程を多少とも侵害し、測定の結果は歪められる。これは人間的な物理測定に避けがたいところである。[19]「しかしかく測定器械は単に受動的な Empfänger（受信者(ママ)）でなく、測定過程に自働的に〔能動的にの意か〕関与し因果的影響を与える〔9〕〔。〕その器械を含めて〔はじめて〕物理的系は法則的全体となる[20]」——完結した全体、単一の形象 eine abgeschlossene Ganzheit として——。そこでプランクは物理学へ全体性 Ganzheit の概念を導入することが必要になった。

もちろん、かかる全体に対しては、なんら外部からの作用は考えられないので、直接の検討は不可能となる。しかし幸いにしてわれわれはなんらの精度の限界のない、測定器械を有している。これすなわち、われわれの思想の飛揚 Flug unserer Gedenken である。すなわちわれわれは freie Spekulation〔自由な思考〕において、すなわち精度に限界のない思考実験において、学者の精神が現実の測定器具の世界を超える。思考実験は現実に実現されなくとも差支えない。たとえば幾何学的図形の証明力はそれの実験にはあらわされないといい、しかして思考実験は恒(つね)に世界のハルモニーを信じている。

この完全なハルモニーを見わたすには理想的ないっさいを見透す精神が必要であり、この精神は恒に主体であって、客体とはならぬから、科学的思惟の前提たる思惟する主観と思惟された客観との鋭い分離も可能である。この理想的な精神は因果性を破壊することはないが、われわれはこの

Kausalität〔因果性〕がいかなる形態で表現されるかをあらかじめ知ることはできない。Kausalität を客観的認識の前提として、科学の全発展の先頭にポスチュラートとして要請し、またはイマヌエル・カントとともにこれを範疇とせねばならぬ。すなわち「Kausalgesetz〔因果律〕は正しいとか誤っている richtig oder falsch[20] とか言わるべきものはなく、すなわち Wahrheitschaft〔真理性〕を問わるべきものではなく、発見法的原理、道標であり、論理的に基礎づけられぬから科学的に価値なしとするのは誤りである。なぜならば、われわれに許された喜びは、レッシングが真理についていったごとく、それを所有することにあるのではなく、それを追求することにある。[21]

(1) Planck, *Positivismus und reale Aussenwelt* (1931)
(2) M. Planck, *Wege zur physikalischen Erkenntnis* (1933) Leipzig, S. 260 以下。*Ursprung und Auswirkung wissenschaftlichen Ideen*, S. 277 にも同様。
(3) A. Einstein, On the method of theoretical physics, *Mein Weltbild* (1934) 中に収録、石井・稲葉訳「我が世界観」（白揚社）。
(4) *Phys. Rev.* vol. 47, S. 777 (1935) なおこれについての詳細の紹介は、藤岡由夫氏「物理学ノート」（河出書房）。
(5) Max. v. Laue. *Die Naturwiss*, vol. 20, S. 915 (1932), Zu den Erörterungen über Kausalität, *Naturwiss.* 22, S. 439. (1934), Heisenbergs Ungenanigkeitsrelation und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung
(6) Schrödinger; Über die Unanwendbarkeit der Geometrie im Kleinen, *Naturwiss.* 22, S. 518. f. (1934)
(7) Schrödinger, *Indeterminismus in der Physik*, Leipzig (1932)
(8) Dingler, *Die Methode der Physik*, S. 387
(9) Behlich〔Berlin の？H・J〕・ライヒェンバハは *Erkenntnis* 3, 1932/33, S. 401 で Kausalgesetz を Konvergenzgesetz として、しかもその精度〔に〕は Naturgesetzliche な Grenz がおかれ、すべての自然法則の確率法則的性格を証明せんがために Voraussagbarkeit の Grenz を支配する濃密な自然法則を仮定する。circulus in propando〔循環論〕また、ライヒェンバハはすべての Wirklichkeitsaussage の必然的構成初部として確率概念が

必要であり、これによって初めて因果性も意味を有するに至る。すべての自然法則は Unsicherheit をもち、Limes—aussage〔の見地からいえば〕Usnbestimmtheitbeziehung は Limes が1とならず、すでにそうした確実性の前に到達しうる限界がある。

(10) J・フレンケルはレニングラードの教授であったが〔米国ミネソタ大学に出講したのを機として著わした *Wave Mechanics, Elementary Theory*, 1932, P. 50—51 で〕、「のちにボーアによって提出された波堆 wave packet の理論からの不確定性関係の導き方に対照して、ハイゼンベルクはまったく異なった考慮によってこれらの粒子が観測される実験的条件から導き、incidentally には波動・粒子平行論を用いつつも、その重要性を十分評価せずに、この位置、運動量を同時に測定しえないことを原理に高めて、アインシュタインの relativity における相対性原理のごとく見なさんとする。しかし、この observer の interference の原理は根本的なものではなく、むしろはなはだしく誇張されている。これは古典論においても温度の変化や電位の測定の際に知られたことであり、きわめて古く、実際まったく trivial である。しばしば信ぜられるごとくこの干渉を適用することが不決定性に導くのではなくて、単に現象にあらかじめ存在した不決定性をあらわす reveal にすぎない。ハイゼンベルクの取扱いで共軛量が不確定になるのは、その変化が時間について不確定（transition とか jump とかの言葉で表わされるごとく）なため、直接観測された量の値に対応する瞬間の共軛量の値を確かめることができなくなるのである」と評している。

このフレンケルの批評には、なおハイゼンベルクの論法の真意義に徹しない点はあるが、ともかくも物理的分析を企てたものとして、他と異なった、少なくともハイゼンベルクの最初の論文に対しては遅まきながら注目すべき内容をもつものであった。「ハイゼンベルクの論法は実験家の立場であり、wave packet のは理論家の立場である。前者は古い決定論的力学と新しい「indeterministic」な力学との差異に完全には対応しない。この両者の差異は、観測または測定の際に上述の時間に対する変化の型が古典論と新理論と〔で〕異なることにあるのであって、この変化が一方では無視され、一方では考慮されねばならぬ点にあるのではないか」(vgl. Dirac)。

(11) R. v. Mises, Über kausale und statistische Gesetzmässigkeiten〔in〕der Physik. *Naturwiss*. 18, S. 145 f (1930)

(12) R. v. Mises, Über Heisenbergs Ungenauigkeitsbeziehungen und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung: *Naturwiss*. 49, S. 822, (1934)

(13) M. Planck, *Das Weltbild der neueren Physik*. (1929) S. 44 所載。不確定関係の存在について「作用量子によって表現せられるかかる客観的限界の存在こそ確かにそれ自身は、統計には還元されないある新しい法則性の支

配の徴しと見なさねばならぬ」*Die Physik im Kampf um die Weltanschauung*. S. 206 (1937)

(14) M. Planck, *Das Weltbild der neueren Physik.* (1929) S. 44

(15) 前掲 S. 45

(16) M. Planck, *Der Kausalbegriff in der Physik*, S. 45. (1932)

(17) 前掲 S. 9

(18) Planck. *Die Physik im Kampf um die Weltanschauung*, S. 192

(19) われわれ人間は自然過程に対して絶対的に外に立つ中性な観測者ではなくて、その中にかかわりあっている。それで観測もまた主観性に攪乱されている。したがって世界像へも、その主観性に影響された自然認識と自然批判〔法則〕を持ち込むことになる。プランクとハンス・ハルトマンとの対話（一九三二）。H. Hartmann: *Max Planck als Mensch und Denker* (1938)

(20) 前掲 (2) S. 271。

(21) 前掲 (19)。

〔1〕この§14は未整理の度合いがいちじるしいので、本文中に文献番号をそう入するなどの方法で、できるだけ理解しやすくするようにつとめた。

〔2〕プランクの所説は§14の末尾（一九一ページ以下）でもとり上げられており、両部分にかなりの重複がある。

〔3〕選集版では「……少くとも統計學は……」。

〔4〕選集版では「……ハイゼンベルクがかかる方法……」。

〔5〕選集版では「……結論を下すものが……」。

〔6〕A. Eddington, New pathway in science (1935), p. 302

〔7〕以下五行ほどにわたって、選集版ではベルクマンの主張 (Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik, Braunschweig, 1929) とホェーニヒスバルトの主張 (Berliner Berichte) とが入り乱れて紹介されていたので、ここでは、文脈を正した形で示した。

〔8〕選集版では「……分離……」。

〔9〕選集版では「……を與えることは、その器械……」。

〔10〕選集版では「richtung……」。

§15　不確定関係の分析と批判

一九二七年九月の半ばイタリーのコモ Como で、この地に生まれこの地に没した偉大な電気学者アレキサンドロ（ママ）・ヴォルタの〔歿後〕百年祭を兼ねて国際物理学会が開かれた。この会は翌月末の第五回ソルヴェイ会議とともに、ボーア、ハイゼンベルク、シュレーディンガー、ディラック、ボルンらの講演やアインシュタインらの討論もあって、のちにハイゼンベルクも回想したとおり、量子力学の物理的意義を闡するうえに一段階を画したものであった。(1)

なかにもボーアはこの会合の席上「The quantum postulate and the recent development of atomic theory」なる講演をおこなって、量子力学がもたらした変革の本質に〔ついて〕きわめて深刻なる洞察を開陳し、さきのハイゼンベルクの論文を補って、幾多のパラドックスの解決に怪刀乱麻を断つ冴えを見せて、当時として根本的解釈問題に一応の完結を与えたのである。われわれは以下の諸章において幾度かこの講演の内容に触れるであろう。さしあたって、そこでいかに不確定性原理が分析せられ、新たな角度から照明されているかを見たい。

ボーアは、ハイゼンベルクの直観的内容についての研究をもって、量子力学の抽象的・記号的な

方法の「無矛盾性 consistency」の問題は[1]解決と見ているが、彼はそれを分析するに先立って、まずその不確定性にあらわれた記述法の相互補足的な性格が、原子物理学の経験を解釈するに用いられるきわめて基本的・初歩的な概念を分析してすでに得られることを示している。

彼は作用量子と古典概念との根本的なコントラストを、光量子論と物質波動論の共通の基礎たる簡単なる公式

$$E\tau=P\lambda=h \qquad (1)$$

において見る。この公式には、プランクの常数hを媒介とし〔た〕、光および物質の粒子＝波動二元性が、鋭い対立をなして潜んでいる。というのはエネルギーEと運動量Pとは、粒子の概念に連なり、したがって古典的見地にしたがい、定まった時空座標で与えられるが、これに対し、相当する振動の周期τと波長λとは調和平面波の〔列〕plane harmonic wave train についてのものであるから、時空的には限界のないものである。後者を通常の現象記述と関連させるには、波動の重畳原理によって、τ、λを異にする（調和）波の群を[2]相互に干渉させて波動の場の広さに時間空間的の限界をつくらねばならない。L・ドゥ・ブロイが粒子の進行速度は波の群速度で表わされると言うのもかくしてのみ可能である。

かく〔して〕、波の群速度と粒子の速度とが同一視されるということは、一面において量子論においても空間-時間的 picture〔描像〕の適用しうる場面の存することを指示するものではあるが、ここに、波動の群を用うることは周期および波動の定義において精密さを犠牲に供せざるをえないという、いわゆる相互補足的記述の特徴が現われてくる。これからまた、関係（1）によって直ち

に観取されるごとく、エネルギー、運動量の定義においても相当した不精密さを結果するのである。

いま、平面基本波を

$$A\cos 2\pi(\nu t - x\sigma_x - y\sigma_y - z\sigma_z + \delta)$$

とするとき、ここにA、δはそれぞれ振幅と位相を定義する常数であり、$\nu=\frac{1}{\tau}$は振動数 frequency、σ_x、σ_y、σ_zは座標軸の方向の波数 wave number で、伝播方向の波数$\sigma=\frac{1}{\lambda}$のヴェ〔ママ〕クトル成分と見なしうるものである。その場合、制限された波動場を構成するには、厳密にいえばνおよびσ_x、σ_y、σ_zのすべての値に相当する elementary〔基本〕波の種々を重畳しなければならない。しかし、光学器械の理論、とくに分光器の resolving power〔分解能〕に関するレイリーの研究によれば、波動群中の二つの elementary 波に対するこれらの値の差の平均の程度は、最もぐあいのよい場合で、

$$\Delta t\Delta\nu = \Delta x\Delta\sigma_x = \Delta y\Delta\sigma_y = \Delta z\Delta\sigma_z = 1 \qquad (2)$$

なる関係にある。この関係は波の列 train が波動場の時間空間的限界で干渉により相互に消しあう場合の条件を表わすのである。すなわちこれは、波動群は全体としては、基本波と同じような意味での位相なるものをもたないことを示している。これは（1）より

$$\Delta t\Delta E = \Delta x\Delta P_x = \Delta y\Delta P_y = \Delta z\Delta P_z = h \qquad (3)$$

を結果するが、これこそハイゼンベルクの不確定関係にほかならない。もちろんこの関係は、波動場をともなう粒子についておよそ得られうる最高の精度を示すにすぎないから、一般にはもっと不精密となる。たとえある場合に不確定関係（3）のごとく精密に波動群が構成されても、時が経つ

とともにこれはしだいに変じて、粒子をあらわすには不都合となってくる。この事情あるがために、光量子および物質粒子の本質に関して幾多のパラドキシカルな問題が起こってきたのである。かく不確定関係は、古典概念の制限を表現するとともに、これにさらに加えて古典力学の確実性の制限と密接に結びついている。すなわち、これは波動の伝播が「光線」によって描写される幾何学に相当し、かかる制限の範囲内でのみエネルギーおよび運動量は時空的描像について曖昧なく定義されるのである。相対性理論の言葉を借りれば、時空点における明確に定義される事象の一致 coincidence なる概念は、有限の時空領域における不精密に定義された個体の概念で置き換えられなければならない。しかして量子論によると、時空およびエネルギー、運動量ヴェクトルの定義は、一般的相互関係（3）で示されるような精密さの最高限度で限定されているということができる。この事情は、時間－空間的の記述と因果性の要求とが相互補足的な性格をもつことを簡単に記号的に表現したものということができる。

かかるボーアの行論、不確定関係の演繹のうちに、われわれは前節（ママ）〔むしろ§13〕の終りに触れた粒子－波動像の対照を見出し、ここでは測定の問題は推論の表面から姿を潜め、いわば不確定関係は、測定過程の吟味とは独立に経験的事実として粒子－波動性の直接の**客観的**結果として証明されたかに見える。ボーアは測定という言葉は一度も用いずに、概念の定義 Definition を問題にしている。いわば、事実連関の分析のまえにまず意識〔味？〕連関の分析が企てられている。Definition を測定と訳してはボーアの方法論的に意味深い叙述法を台なしにするであろう。

すでに触れたごとくボーアは、ハイゼンベルクの思考実験を量子力学的方法の「無矛盾性」の証

明として特徴づけ、この考察のエッセンスは「測定の可能性の評価における quantum postulate〔量子的基本前提〕の不可欠性」にありとしているが、この事情を強調して思考実験を量子力学の無矛盾性と結びつけた論理としてきわめて特徴ある数学者J・v・ノイマンの言葉を引用してみよう。ノイマンは不確定関係を量子力学の数学的形式から導来し、つづいて言う〔*M. G. QM.*〕。「しかし以上の考察によってわれわれは不確定関係のわずかに一つの側面すなわち形式的な測定を把握したのみである。この関係の完全な理解にはなお、これを他の見地、すなわち直接的・物理的経験の見地から観察することが必要である。なぜならば不確定関係と物理的経験とは、量子力学建設の基礎となっている多くの事実に比して容易(たやす)く見透しの利く簡単な関係にあり、したがって上述のまったく形式的な導き方では不十分である。一見すると不確定関係は直観と矛盾するというような印象を受けるので、直観的な論証はますます必要である。事実一つの質点の位置と速度（すなわち座標と運動量）を十分精密な測定器械があっても同時に任意に正確には測りえないということはすぐには理解できない。それゆえ、極度に精密な（もちろん、思考実験としてのみおこなえるような）測定過程を正確に分析して、矛盾のない所以(ゆえん)を明らかにする必要がある。すなわち、波動光学や電気力学や原子的基本過程の周知の法則が、まさに不確定関係の要求するその点において精密測定に対して打ち克つべからざる困難な限界を画することが立証されねばならない。この事実はもちろん、測定過程を（量子論にでなく！）純古典的に研究してすでに認識しうるものでなければならない。この点は原理的に重要である。なぜならば、それにより、量子力学の正否とは独立に確かめられた古典的領域（すなわち、量子現象がなお従来の考察法に本質的な訂正を強要しない領域）で——つま

り、われわれの直観が直接近づきうる本来唯一の領域〔で〕――パラドックスに聞こえる量子力学の不確定関係となんらの徴候〔矛盾？〕をきたさぬことが[3]証明されるからである。」

ノイマンはついでハイゼンベルク、ボルンにならってγ線顕微鏡の思考実験を分析しているが、その考察では光量子の存在を利用する一点において古典的とは言えないと註している。

このノイマンの論法は不確定関係の論理的・方法論的意義を明らかにする点で意義があるが、彼がその推論の古典性を強調するのはやや事態に即しないものがある。いかにも不確定関係は量子力学の抽象的方法が直観的経験と矛盾しないという意味では一つのアナロギーである。しかして光や物質粒子が幾多の実験で（コンプトン効果や、ウィルソン霧函や、さては結晶による回折）「古典的な」粒子と波動とに一致する性質を示すことは著しい事実である。ハイゼンベルク思考実験の論理的意義は、物質粒子も光も、まさにかかる実験の性質に応じて古典的粒子性と波動性との相互に相容れぬ両面を示す経験的事実に基づき、粒子像は波動性によって制限せられ、波動像は粒子性によって制限されるために生じるその概念の適用の限界を画定する点にある。

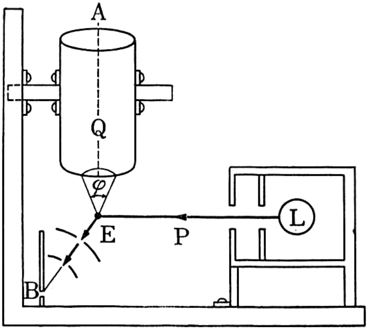
P・ヨルダンは物質および光が粒子‐波動両性質を同時に備えているとしばしば通俗的に言われるのを戒めて、粒子性と波動性とを**同時 zugleich に**証明するような実験は、単に古典理論に矛盾するばかりでなく「**論理的・数学的に不合理**」である[2]と注意している。まったく端的に、古典的粒子像をとれば、波動像と矛盾することは明らかである。不確定関係は一方にはまさにかかる論理矛盾をきたすことなく古典的直観的像を適用しうる限界を示すものである。

以上のごとき意義を念頭にしてハイゼンベルクの思考実験を取り上げるならば、そこには、あま

りにも通俗化して人をしてまたかの感をいだかしめるというγ線顕微鏡の例も、示唆するところ絶無ではあるまい。

いま、位置測定のためにγ線顕微鏡が用いられたとする[4]。いま、測定対象として電子Eをとる。電子は、顕微鏡の対物レンズから〔むしろレンズの下方、Heisenberg, *P. QT*, S. 15〕、Eから出る散乱光束の開きの角がほぼφとなるような箇所を運動している。いま、光を光源Lからslit〔つまり細隙ss〕を通ってx方向に発し、ここで位置のx座標と、運動量のx成分p_xのみを問題にする。なぜなら、y-、z-方向の量は独立無関係と考えられるからである。

電子に衝突する光の波長と振動数をそれぞれλ、νとすると、顕微鏡の分解能に関するレイリーの式からx方向の位置測定の精度は



$$\Delta x \sim \frac{\lambda}{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \qquad (1)$$

となる。位置測定のためには**少なくとも一つの**光量子Pが電子Eで散乱され、顕微鏡を通じ観測者の眼（ないし計数管、螢光板、写真乾板）に達しなければならない。ところがこの光量子のために、電子はコンプトン効果で$\frac{h\nu}{c}$の程度の衝撃〔反跳、以下の傍点の箇所も同様〕を受けるが、これ〔反跳〕は、光量子の方向が光束φの範囲で不明となる〔ので、正確にはわからない〕。それでx方向の衝撃の不精確さは

$$\Delta p_x \sim \frac{h\nu}{c}\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \qquad (2)$$

となる。ここにcは光速度である。これから

$$\Delta x \Delta p_x \sim h$$

を得る。（かような qualitativ〔質的〕な考察では $\Delta x \Delta p_x \geqq \frac{h}{2\pi}$ を導くわけにはいかぬ。）

もちろん、この際γ量子が顕微鏡のレンズを構成する分子を破壊するようなことは考えていないが、もし顕微鏡を非常に可動的なものにして、この光量子の顕微鏡に対する衝撃を測れば、光束中の光量子の通過した方向もわかり、したがって光量子が電子に与えた衝撃も（2）より精確に判明すると考える人があるかも知れない。しかしこれは、なんら不確定関係を破ることにはならない。なぜならば、かくなれば顕微鏡自身の位置が問題になり、その位置と運動量とのあいだにはふたたび不確定関係が成り立つからである。

もっとも電子と固定した物尺（ママ）とを〔可動の顕微鏡で〕同時に観測すれば、顕微鏡の位置は問題ではなくなるが、そうなると少なくとも二つの光量子が〔一つは物尺から、一つは電子から〕顕微鏡を通って観測者に達するので、顕微鏡の受けた衝撃を測定しても電子からきた光量子の通路は不明である。さらに、顕微鏡を通じて形成される回折像の Maximum〔極大〕の点を測って電子の位置測定の精度を高めうると考えるかも知れないが、位置の精度の高まる割合だけ運動量の精度は低くなり、やはりその積はhの程度である。

以上の推論で特徴的なのは、位置の不確定性すなわちh（ママ）〔Δx〕が光の波動性から、運動量のそれ、

すなわち$h\nu$（ママ）〔Δpx〕が光の粒子性から由来していることである。すなわち、ここで問題となるのは観測手段たる光の二元的性格で、電子そのものの二元性ではない。それゆえ電子の古典的粒子像はその位置－運動量を同時に「**知る**」**こと**が不可能になるだけで、直接に、粒子性が制限されるわけではない。また、光が電子に衝突しなかったり、また衝突しても顕微鏡に入らないような場合は、測定は**不成功**に終わるのであるが、もちろん、かような場合が非常に多いので、この実験は一定の結果を得る見込みがほとんどなく、きわめて実際的ではないのである。

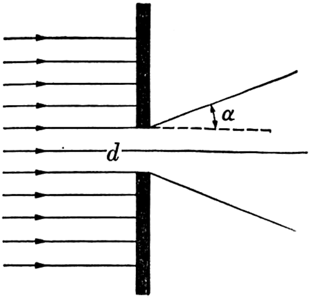
さて、このγ線顕微鏡の例は、それが微小なるものを観測する意味でまず最もポピュラーな顕微鏡を採用したのであろうが、じつはこれは理論的にはそうとう複雑な内容をもっている。第一にこの測定に用いられるγ－量子は、一般的には観測手段と見なされているが、観測の媒介をなすとの意味で観測手段と考えるのもけっして不合理ではない。いなそればかりではなく、光は観測手段として特殊な意義を有するかに誤解され、物指の読取りや、写真乾板の検討すらも光なくしてはおこなわれないではないかというような謬論さえも生まれている。光は簡単であるにすぎない。一般的には〔観測は〕電子衝突をもっておこなえるし、後述の第二の細隙の例ではまったく機械的〔な〕構造〔によって観測がおこなわれるの〕である。しかし、ボーアやハイゼンベルクも注意しているように、一度粗視的に翻訳された測定結果は、それが物指〔や〕指針の目盛りの読みであれ、写真乾板の黒点であれ、これはここで問題としている観測対象たる電子の位置－運動量の不確定関係とはなんら直接の関係はないのである。そして原子的見地からいえば、光に対して無感覚な先天的盲人にも物理観測は可能であり、不確定関係は一点欠くるところなく理解されるはずである。

かように、光は一つの観測手段として考えられるが、一面、光量子それ自体は粗視的物体ではないから、さらにこれを時空的－古典運動学的に翻訳する粗視的な装置を待たずしては観測は完結しない。この思考実験の場合にも明らかに顕微鏡がその役割を演じている。これを除いてはまったく成り立たない。では、観測手段と対象との不可制御的交互作用から不確定性関係が生じると言われる場合、そもそもそれはいかなる内容をもつのか。

P・W・ブリッジマンは、「われわれが位置、運動量を同時に観測しえないのは、光量子、電子、細孔ないしより複雑な系相互間の衝突の詳細を追及しえないことに由来する。しかしてこれは、かかる衝突の詳細を測るに足る精微(ママ)なる道具が存在しないためであり、不確定関係は、位置、速度のごとき古典概念の validity〔妥当性〕を保存せんがために必要な、新しい実験的発見の性格を暗示する点で重要なのだ」と指摘しているそうである。ケンブルは正当にも、「かかるハイゼンベルク関係を破る実験的手段の発見は、現在の量子力学をより精微(ママ)にすることではなく、その本質的な形態の完全な破壊をもたらすのみであろう」と反駁している。[5] しかしながらこのブリッジマンの言葉の前半は、観測手段と対象との交互作用において不可制限的な擾乱を及ぼすという慣用句と、区別しがたく混同される憂(うれい)がある。光を観測手段と考えるには十分な注意が必要であることは上述のとおりであるが、この場合、光と電子との交互作用はけっして偶然的・無法則的なものではない。量子力学の重要な基本的実験たるコンプトン－サイモンの光量子と電子の衝突実験がまさにその厳密なる相互連関の確立であり、これはエネルギーおよび運動量〔の〕保存則の個別過程に対する成立として特徴づけられる。それで上にも述べたごとく、散乱された光量子を測定する**装置**のいかんに

よっては、位置**または**運動量はいかほどにも正確に測定できるのである。（相対論的効果は度外視している。）これは交互作用の結果が厳密に決定されていることを示している。そしてこれは、のちに述べるアインシュタインに問題とされた場合である。もちろん人は、作用量子hの有限性なくしては不確定性原理は成立しないと反駁もしよう。それはそのとおりである。しかしそのhの有限性が不確定性となって表現される結局の場面は、散乱された光量子と顕微鏡との関係であって、電子の位置、運動量の不確定性はじつは直接、観測に対しては光量子の仕事、運動量の不確定性に帰するのであって、前者のは光量子との（確定的な）関連から間接〔に〕導き出されるのである。

これに反して次の思考実験は直接、物質の粒子波動二元性を適用しており、実際的にも用いられる。この場合は実際は観測というよりもじつは択り分けによるプレパレーション〔ディラックの表現〕であり、観測手段は細隙を構成する固定部分である。



いま、速度がよく知れている電子線束を Blende〔むしろ Schirm、ついたて〕で画(かぎ)るとしよう。これには幅dの細隙 Spalt がある。すると、これを出てくる電子の、この Blende と平行の方向における位置の不確定はdである。細隙を通るときに電子は回折され、ドゥ・ブロイ波の波長をλとすると、その開きαは光学の法則と同様に

$$\sin\alpha \sim \frac{\lambda}{d}$$

であるが、この方向の運動量の不確定は $\Delta p = \frac{h}{\lambda}\sin\alpha$ であるので

$$\Delta p \Delta q \sim h$$

を得る。この場合、測定手段としての Blende が電子と交互作用し、それに擾乱を与えたと考えられるのである。

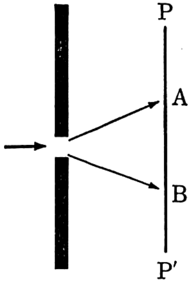
以上二つの場合を見るに、古典的粒子像は不確定関係の制限内においてのみ測定される。したがって、粗視的領域で広くその妥当性を証明された古典力学も、この制限を超えてはまったく経験の根拠を得られぬことが、きわめて簡単な経験的に知られた粒子‐波動二元性に基づいて証明されたのである。これは量子力学が古典力学を変革して独自の領域を開拓する権利を保証するものである。

これらのほか、古典的粒子像の制限を示す思考実験の数は少なくないが、われわれはそれがすべて同一の不確定関係に導くことのみ注意して、その詳細はハイゼンベルクの著述に譲ることにする。ただ一つ注意しておきたいのは、不確定関係は過去に適用すべきでないといわれる点についてである。たとえば、ある時間 t_1 としばらく後の時間 t_2 に正確に位置→座標を測定することによって、回顧的に過去の速度と位置とをともに（不確定関係の制限以上に）正確に算出することができる。また最初の位置測定のかわりに、速度が精確に測られても同様である。

もちろん、かかる位置と速度とはまったく観念的なもので、なんらこれを測定によって立証することもできず、粒子像を初めから実在と前提してのみ意味をもつものであるが、[3] なんらその後の粒子の運動の予言にも役立たぬ純回顧的なものであるから、[4]「これに物理的意味を付与するといなとは各人の趣味の問題である」[5] と言われる。しかし「一般的に過去には不確定関係は適用されない」と言う[6]のは不正確である。すなわち適用されないのは第一測定と第二測定とのあいだにおいてであ

って、第一測定以前はやはり不確定関係の制限を受けるのである。これはアインシュタイン－トールマン－ポドルスキが示したとおりである。[7]（ただし彼らの不手際な思考実験〔で〕は、結論とは関係はないが、その推論途中で、箱の質量から中の粒子のエネルギーを測定する〔点に〕重大な見落としがあると思う。）

P・ヨルダンは、「中間をモデル的に粒子像で考えるのは古典的習慣にすぎず、予見 Prognostierung が不可能な以上、かかる中間値の算出は inhaltsleer〔無内容〕だ」といっている。[8] ディラックも言うとおり、「量子力学は、実験と関係のない現象の whole causal〔正しくは whole course 全過程〕を知る必要はない。Continuous〔picture、連続的な描像〕は不可能である」（Dirac; *P. Q. M.* 1. Ed. p. 4, 5, 7)。「連続的 continuous な運動を考えるのは物質の線束のごとく統計的な集団についてのみである」と、レヴィ－チヴィタは言っている（T. Levi—Civita, *Bul, Amer. Math. Soc.* p. 537, 1933)。ドゥ・ブロイはこの問題を説明するにあたり、「仮にそのような位置－運動量が計算で出たとしても、まったく同じ条件のもとで実験を繰り返しても同じ結果が得られないから無意味である」[9] という意味のことを述べている。v・ラウエも同様に、「かかる思考実験は個別的対象を取り扱うから、パラドックスを生じるので、多数の対象につき統計的解釈を下せばかかるパラドックスは生じない」と言っている。[10] しかしわれわれは、すでにまえに述べたところから、以上のパラドックスのごときは、直観的経験と量子力学との無矛盾性の証明を主眼とする思考実験の論理的方法論的意義になんらの障害とはならぬことを知る。



なぜならこのパラドックスは、ボーアも言うとおり、まったく「観念的」で直観的経験にかかわらないからである。

かくて、上述のv・ラウエやドゥ・ブロイの大数的・統計的見地からする批評は、思考実験の論理的意義を減殺するものではないが、一面、量子物理的実験における統計的考察の重要性を示唆している点も見のがしがたい。

量子論的領域においては、偶然に得られたただ一つの値は積極的意義をほとんどもたない。たとえば、一つの細隙を通過した一つの電子が、写真乾板PP′の一点Aに来たったとすれば、これはわずかにAに電子の来る確率が零でないことを示すのみである。もしもある理論からA点に電子の来る確率を零と結論されるならば、この実験結果はその理論をくつがえすに足るかも知れない。しかし、この一つの偶然な結果からはそれ以上の積極的結論は得られない。

いやしくも科学が法則性の追求をその使命とする以上、かかる個別的な偶然的結果は、端々（ママ）に個別的に考えれば理論の実験的根拠としてまったく無意味とさえ言える。もしもA点への出現をもって、この実験条件の一つの必然的結果と見なせば、第二の実験においては電子は他の点B点にあらわれて、第一の結果を覆すであろう。多数の実験の結果により、電子の統計的分布が明らかにせられてはじめて、この実験は、科学的法則性確立の根拠となるのである。上述の実験のもつ消極的意義率（確率≠0）も、つねに確率概念のうちに統計的考察を予想して初めて意義をもつのである。

この意味では、v・ミーゼスも言うとおり、不確定関係のΔqやΔpは誤差論、いな統計学における大数の概念を借りてのみ科学的に明確な意義を得る。それは「**平均**」的な誤差であった。かような

事情から、量子力学は必然的に統計的見地を採用することになる。この第一義的な法則性と統計との必然的連関に比すれば、E・C・ケンブルが「統計集団導入の必然性」の題下で述べている他の事情〔5〕のごときはむしろ第二義的・派生的である。

（1） ハイゼンベルクによれば、この〔ソルヴェイ〕Kongress は種々の研究方向の学者がたがいに討論することにより、量子論の物理学的基礎を闡明し、ある意味で一段落を表わし、完結した理論として懸念なく適用しうるようになった。

（2） したがってわれわれは、ある実験は粒子性を示し、ある他の実験は波動性を示すと言うべきである。〔P. Jordan〕 A. *QT.* S. 115—117

（3） N. Bohr, *Naturwiss*, 16, S. 249. (1928), *AT. NB.* S. 43

（4） A. Eddington. *The nature of the physical world*, p.307 (1928)

（5） W. Heisenberg, *P, QT.* S. 15 (1930)

（6） C. G. Darwin, *Science* 73. p. 653 (1931), *The new conception of matter*, p.100 (1931)

（7） A. Einstein, Tolman, Podolsky, *Phys. Rev.* 37, p. 780 (1931)

（8） P. Jordan, A. *QT.* S. 308

（9） L. de Broglie. *Introduction*, p.176—7

（10） M. v. Laue, *Handbuch d. Radiologie* Ⅵ/1 2te Aufl. S. 77 (1933)

〔1〕 選集版では「……の問題を……」。

〔2〕 選集版では「……（調和）波の群に……」。

〔3〕 選集版では「……ことを証明する……」。

〔4〕 本節の二つの図で説明された思考実験の叙述は、文献（5）S.15〜18によるものなので、原著および訳書（ハイゼンベルク、玉木・遠藤・小出訳『量子論の物理的基礎』一九五四、二一〜二六ページ）によって校訂した。」

〔5〕 E. C. Kemble, *The fundamental principles of quantum mechanics* p. 76, p. 53 (1937)

§16　量子力学における物理的量の状態の概念

量子力学の対象とする統計集団は、古典統計力学におけるギブズ・アンサンブルとアナローグな集団である。いま、古典物理学的系をダイナミカル座標、すなわちすべての位置および運動量座標からなる phase space (位相空間) と呼ばれる一つの (仮想的な) 空間中で考える。この空間の次元の数は系の自由度の二倍である。すると系の任意の状態はこの空間内の一点で代表される。つまり k 自由度の古典力学的系の決定要素は $2k$ 個——k 個の位置座標および k 個の運動量座標——であり、$2k$ 個の独立な実験で系の状態が完全に決定されるわけである。さてこの代表点は古典的運動方程式にしたがって運動する。いま、問題としている系が或る時間にはっきり決まった状態にあることが与えられず、一定の確率的法則にしたがい、多数の可能な状態のうちの一つにあるとしよう。これは位相空間中の流体で代表され、位相空間中のある容積中の流体の質量は系の代表点がこの容積内にある確率の総和である。そしてこの流体の各粒子は古典的運動方程式にしたがって運動をつづけていくのである。このような多数の系の群がギブズによって導入されたアンサンブルである。空間中の一点におけるこの流体の密度 ρ は、系が相当する状態の付近にある確率 per unit volume of

phase space〔位相空間の単位体積あたりの確率〕を意味するわけである。

量子力学においてもJ・v・ノイマンが示したごとく、これと相似した統計集団が考えられ、相当する密度ρを導入することができる。しかし、量子力学では phase space〔位相空間〕は無意味であり、qとpに同時に数値を与ええぬ事情を考えると、ディラックもいうごとくこのアナロギーは意外なくらいである。

しかし、われわれがこれから取り扱おうとする統計集団の状態は単一の波動函数で記述され、この集団のすべての系はあらゆる点においてまったく等しい波動函数をもってその未来の変化が規定されているという点で古典統計力学の統計集団を量子力学的に取り扱おうとするものではない。古典統計力学では無限に多くのシャープに定まった古典的状態の集団を取り扱ったが、われわれのいまから問題にするのは主として単一の量子力学的状態である。古典統計力学の量子力学的一般化はいわゆる**量子統計力学**であって、これは多くの量子力学的状態を含む集団であり、したがって多くの独立な波動函数で記述される。これはいわゆる「Gemisch 混合」と呼ばれる集団であり、いまここに問題とする単一の状態、単一の波動函数で記述される「reiner Fall（純粋状態）」または「einheitlicher Zustand（単一状態）」と呼ばれる集団とは区別せねばならぬ。

量子力学的系の状態はこれを幾何学的にいえば一般には（抽象的な）無限次元ヒルベルト空間内の一つの複素ヴェクトルで代表される。このヴェクトルは大きさは任意であって、方向だけが問題にされるので、正しくは射線 Strahlen と呼ばれるものである。また系はこの空間内の単位球の球面上の一点で代表されると言っても内容は同じである。波動函数Ψはこの射線もしくは単

位ヴェクトルを解析的に表現したものにほかならない。これは古典力学の状態が位相空間の一点で代表されるのとアナローグではあるが、Ψそれ自身は直観的意味を有しないという点で、位置および運動量座標のごとき物理量とははなはだ様子が異なっている。

古典力学に対し量子力学における物理的量は、ヒルベルト空間内でこの射線Ψに他の射線$R\Psi$を対応せしむる対称エルミート的演算子Rで表現される。この演算子 Operator がハイゼンベルクらのマトリックス、ディラックのいわゆるオブザーバブルに対応するものである。逆にすべてのエルミート演算子には、ある系の物理的量または「オブザーバブル」が対応すると考えるのはヨルダンやJ・v・ノイマンの立場であり、これに対しW・パウリのごとき学者は、「何が物理的量であるかは、理論をさらに展開して経験的事実に照合して決定すべきである」と主張している〔P. W. 一三三ページ〕。しかし、今日まで前者の説を駁するような事実は知られていないので、最近においてもノイマンはこれをポステュレートし、ただ「ある演算子環Mに属する」という制限を入れればなおさら要求が少なくなると言っている〔G. Birkoff and J. v. Neumann; *Annals of Math.* 37, p. 823 (1936)〕。ヨルダンも、パウリの注意は将来の理論の発展にあまり役立つとも思われないと評している。[2]

これだけではまだきわめて一般的で、物理的量のさらに詳細な規定は次章§17で述べる。いずれにせよ物理的量は観測値のごとき数値をもつ c-number ではなく、抽象的な q-number〔Dirac, *Proc. Roy. Soc.* 110, P. 561 (1926) に始まる表現〕であり、これら q-number のあいだには一般には乗法の交換法則が成立せず、とくに成立する場合には相互に可換 vertauschbar であると言われる。結局、のちにも述べるごとく、量子力学では物理的量はそれから数値を見出すために測定する測定

の仕方で定義するほかはない。

いま、ディラックらにしたがって量子力学の根本理論を時間に対する関係から二大部門へ分かてば、第一は、一時間点における原子系の状態を支配する諸関係を取り扱う部門であり、これがとくに古典力学と著しい対照をなしていることはただちに示される[1]であろう。第二は、状態の「時間的」な——詳しく言えば時間に対して連続的な——変化を取り扱う部門であり、これは古典力学の運動方程式と類似した法則をもつ。

さて、ある瞬間におけるn自由度の量子力学的系の状態は、n個の独立にして可換な物理的量の固有値によって完全に規定される[2]。この場合物理的量の可換性とは、二つの演算子の適用順序が結果する数値に影響しないこと（乗法の交換法則の成立）であり、これを具体的に言えば、二つの物理的量を相次いで測定する場合、両者のいずれを先にするも各々がそれぞれ或る値を結果する確率が変わらぬことを意味する。これは一方の量の測定が他方に影響しないことにほかならないから、二つの物理的量の同時可測性（測定の compatibility）を意味する。

これに反して非可換性は、一方の測定が他の物理的量に擾乱を及ぼし、まえもって測られた結果を覆滅することで[3]ある。もし、シュレーディンガーのいうごとく[4]「以前の測定結果の知識を覆滅するという言い表わし方が不適」ならば、第二の測定は、まえの測定の結果、系がとるべき物理的量の値が、客観的に状態を変えてしまうことによって変化せしめ〔られ〕ると言うべきであろう。これが乗法の交換法則不成立の物理的意味である。

そこでn回の測定によれば、いっさいの過去の状態から独立[5]に現在の状態が完全に決定されるのであり、これは、nがたがいに独立で compatible な観測の最大数であり、これ以上異なる測定をおこなえば以前の測定結果を犠牲にすることになるような最大限度に決定された極状態を得ることにほかならない（Dirac, *P. Q. M.* p. 12—14）。この一定〔の極〕状態にある多数の系は、量子力学では客観的・原理的に無差別で、それ以上分割しえず、また、他の状態の合成からは得られないのである。すなわちこれは上述の純粋状態ないし単一状態と呼ばれるものにほかならない。

原理的考察からすれば、任意の物理的量に〔ついて〕は、かかる純粋状態を測定によって確かめるか、さらに実際的には択り分けによって準備することはつねに可能であると見られる。しかし、純粋状態を準備することは、系なり集団なりの過去の歴史をまったく覆すことであるから、歴史性そのものの観察が本質的な役割を演じるような集団（たとえば hysteresis〔履歴現象〕を示す固体や生体等）につい〔対し？〕て、勝手に純粋な基本過程に主眼点をもつ量子力学の見のがしがたい性格であろう。かく量子力学的には完全に決定された状態である絶対状態も、これを規定するn個以外の物理的量を測定すれば、その結果として得られる値は一定せず、一般に、ある確率をもって分散した値の分布が得られる。この事情を少しく具体的に示してみよう。

いま、多数の要素S_1、……、S_n（nは十分大）からなる統計集団を考え（Sはすべて同一の物理的構成を有するが、その状態は必ずしも等しからず、一般には混合状態と考えよう）、これについてたがいに独立なる物理的量L、M、N……、P、Q、R（$\mathfrak{L}, \mathfrak{M}, \mathfrak{N}$, ……$\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}, \mathfrak{R}$, …）が定義されている。$\mathfrak{L}, \mathfrak{M}, \mathfrak{N}$……の群と、$\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}, \mathfrak{R}$……の群とはおのおの群のなかでは相互に可換

すなわち同時に測定しうるが、他群のものとは同時に測定することは不可能であるとする。

いまこの統計集団から純粋状態を作り出すためには測定ないしそれに相当する preparation の方法によって、$\mathfrak{L}$, $\mathfrak{M}$, $\mathfrak{N}$…… についてそれぞれ一定値 $\lambda_{\mathfrak{L}}$, $\mu_{\mathfrak{M}}$, $\nu_{\mathfrak{N}}$, …… を有する系のみを択り分けなければならない。まずLについて測定し、$S_1 \cdots S_n$ のうち〔$S'_1 \cdots\cdots S'_L$〕まではすべてLの値として $\lambda_{\mathfrak{L}}$ を有し、〔$S^*_1 \cdots\cdots S^*_L$〕は然らずとする。この〔$S'_1 \cdots\cdots S'_L$〕のうちから $\mathfrak{M}$ につき $\mu_{\mathfrak{M}}$ を有する系を選び出し、それを〔$S''_1 \cdots\cdots S''_M$〕とすれば、$S''_1 \cdots\cdots S''_M$ は、$\mathfrak{L}$、$\mathfrak{M}$ についていずれも等しい値 $\lambda_{\mathfrak{L}}'$、$\mu_{\mathfrak{M}}''$ を有する。これは、$\mathfrak{L}$、$\mathfrak{M}$ の commutability、すなわち $\mathfrak{M}$ の測定が系を擾乱して $\lambda_{\mathfrak{N}}'$ を変じることがないので初めて可能である。……かく択り分けをつづけてしだいに純粋な系を作り、最後に $\mathfrak{N}$ の測定結果、$\nu_{\mathfrak{N}}$ によって、独立可換な物理的量の群のすべての量について、いずれも同一な数値を有する集団、すなわち純粋集団 $S_1^{(n)} \cdots\cdots S_1^{(n)}$ を得る。

「完全に相等しい状態から異なる状態が生じる」この命題は、「状態」という概念を漠然と一般化すれば、明らかに充足理由律の破壊であり科学の放棄である。これが量子力学の結論としてセンセーショナルな文章で宣伝せられるとき、古典的な訓練を受けた学者が沈黙をまもりえないのは蓋し当然であろう。

古典的立場からするとこの窮境を脱するためにただ一つの道が残されているように見える。それは現在の量子力学を不完全として宣言することである。もちろん量子力学が幾多の問題で成功をおさめたことを否定するのではない。しかし、量子力学の成功した問題を注意深く見ると、それは多かれ少なかれ統計的性格をもった問題である。これに反して個別過程、測定の個々の結果を決定的

に導くには、量子力学はまだ「不完全」であって、将来のより完全な理論のみがこれを能くするのではないか。しかして将来の理論によれば、今日[6]、量子力学から見て完全に等しいとされる状態なるものも、じつはまだ発見されていない、ある隠れた量については区々別々であって、純粋状態なるものは、この隠れた量については平均されたもの〔なの〕ではないか。量子力学的に「完全に等しい」状態から異なる結果が生じるのはそれらの状態がこの隠れた量について異なる値を有するからであろう。しからばこの隠れた量を見出すことによって充足理由律も満足される。かかる目標をもって探究するのが科学の道ではないか。この隠れた量は数学的に言えば未知のパラメーターであるから、以上のごとき考え方は「隠れたパラメーター」の理論と呼ばれている。

この考え方を詳細に数学的に批判したのはJ・v・ノイマンである。彼は現在の量子力学の特殊の物理的主張（たとえば運動方程式や系のハミルトニアンの構成決定等）によることなく、きわめて一般的・形式的でほとんど自明な確率論的根本要請から出発して、かかる「隠れたパラメーター」の存在を数学的厳密性をもって否定しようとする。

ノイマンの理論の要旨は、すでに一九二七年ゲッティンゲンの *Nachrichten* に発表された論文[7]に見られ、「量Rに属する測定値の分布が精確なるがためには、ΨがRの固有函数であることが必要にしてかつ十分な条件である。そのときRの値はΨの固有値となる。しかるにΨが固有函数でないような Operator〔演算子または作用素〕Rも確かに存在するから、各状態にはその測定値の分布が精確でないような量が属している」と説かれているが、そこでは「すべての状態にはその測定値の分布が unscharf〔非尖鋭〕であるような（すなわち、個々の測定値が偶然的であるような）物理

的量が必ず存在する」ことが証明されているが、のちの著書〔M. G. QM.〕ではこれはきわめて大がかりな数学的準備をもってより厳密に遂行され、「因果性の数学的否定」が結論されている。彼の仮定は本質的には、

1．量$\mathfrak{R}$がその本質上けっして負でないならば（たとえば他の量$\mathfrak{S}$の平方ならば）その期待値（平均値）は負でない。

2．$\mathrm{Erw}(\mathfrak{R}) \geqq 0$

3．$\mathfrak{R}$、$\mathfrak{S}$……が任意の量なるとき、a、b、……を任意の実数とすると

$$\mathrm{Erw}(a\mathfrak{R}+b\mathfrak{S}+\cdots\cdots)=a\mathrm{Erw}(\mathfrak{R})+b\mathrm{Erw}(\mathfrak{S})+\cdots\cdots$$

および物理的量と Operator の関係について

A 量$\mathfrak{R}$が Operator Rを有するとき、量 $f(\mathfrak{R})$ は Operator $f(R)$ を有す。

B 量$\mathfrak{R}$、S……が Operator R、S……を有するとき、量 $\mathfrak{R}+\mathfrak{S}+\cdots\cdots$ は Operator $R+S+\cdots\cdots$を有す。

そこで彼は、まず任意の$\mathfrak{R}$について、つねに測定値が分散しないような状態は存在するかを問い、無分散 Streuungslos の性質を

$$\mathrm{Erw}(\mathfrak{R}^2)=[\mathrm{Erw}(\mathfrak{R})]^2$$

で特徴づけ、これがすべての$\mathfrak{R}$について成り立つとすると上述の仮定をもって自己矛盾をきたすことを証明づけ、結局、$\mathrm{Erw}(\mathfrak{R})=\mathrm{Erw}'(\mathfrak{R})=\mathrm{Erw}''(\mathfrak{R})$ すなわち、純粋状態は自己とまったく等しい状態の合成の場合にのみ合成される。異なる二つの状態からは合成されないことを演繹した。

かくてv・ノイマンは「量子力学の解釈問題としてではなく、客観的に数学的に、すべての測定値の無分数性は上述の自明的要請と矛盾し、因果性は厳密に否定されたものと考える。量子力学が不完全であると〔して〕も、かかる自明的・数学的前提までもが誤っているとするのはきわめて考えがたいことである」と説いている。以上がいわゆる「因果性の数学的否定」の骨子である。

このv・ノイマンの論法に対しては、批判がないではない。これは彼の論証には確率論的な仮定が含まれているから、それが厳密な因果性と両立しないというのは一種の循環論法であるというのである。

一方において量子力学においても厳密なる法則性がないわけではない。すなわち、ディラックの分類の第二部内に相当し、物理的系の状態の時間的変化（一種の propagation）を記述する法則性である。これは数学的に古典力学の運動方程式のアナロギーで、すなわち、外的擾乱を遮断した純粋状態にある系のΨ函数は量子論的運動方程式に媒介せられて、連続的・一義的に（かつ可逆的に）変化する。

しかし、この運動方程式には二通りの表現がおこなわれている。その一つはシュレーディンガーの方程式であり、HはΨに独立な線型のオペレーターである。

$$i\hbar\frac{d\Psi}{dt}=H\Psi$$

状態の時間的変化はΨを代表する射線の方向が時とともに変化することで表現される。これをシ

ュレーディンガー・ピクチャーと呼ぶ。Hが時間とともに変わらなければ、時間tにおける状態Ψ_tは、時間原点におけるΨ_0が

$$\Psi_t = e^{-\frac{i}{\hbar}t\cdot H}\Psi_0$$

として、explizit〔あらわ〕に表わすことができる。すなわち、外部からの擾乱がないかぎり、任意の時間の状態からそれ以後の任意の時間の状態は数学的に演繹され、またその逆も成り立つわけである（可逆性）。

これに対して、射線の時間的変化の法則が線型であることを考えれば、運動方程式は次のような形式をとることもできる。すなわち、系を代表する射線は固定されていて、逆に座標軸が運動し、時とともに方向を変動する。この見方では、シュレーディンガー・ピクチャーの場合、力学的変数はconstant〔一定〕なlinear operator〔線形演算子〕で代表されたのに反し、力学的変数は座標軸にリファーした線型オペレーターであるから、座標軸の運動にしたがい、一般に時とともに変化する。これをξとすると、運動方程式は

$$i\hbar\frac{d\xi}{dt} = \xi H - H\xi$$

で、これは一九二五年ハイゼンベルクの導いたものであるから、この見方はハイゼンベルク・ピクチャーと呼ばれる。そして以前に述べたとおり、古典運動方程式とのアナロジーからHを系のハミ

ルトニアンと呼ぶのが適当なことがよくわかる。以上二つの見方、シュレーディンガー・ピクチャーとハイゼンベルク・ピクチャーは、その実質において同一であるが、ハイゼンベルク・ピクチャーはハミルトニアンが時間的に不変な量子力学系に対してのみ便利であり、このときハミルトニアン自身を対角線的に表現でき、これはハイゼンベルクの最初の方法であるから、この表現をハイゼンベルク・レプリゼンテーションと呼んでいる。

以上ではシュレーディンガー方程式におけるハミルトニアンは時間を explizit〔あらわ〕に含まないとしてきたのであり、閉鎖した系で外部的影響がない場合、その時間微分は零であり、これがエネルギー保存則を表現するのであるが、じつはシュレーディンガー方程式はかかる場合に制限されるものではない。これがその一つの長所である。ところがハミルトニアンが時とともに変動することは系が外部とエネルギーを交換することを意味し、いまもし測定過程の客観的・物理的内容は被観測系へ或るエネルギー的交渉を一時挿入すること、すなわち観測者によって決められた適当なHの時間依存性にほかならないと考えると、測定による擾乱もこれで、このHの変化を含むシュレーディンガー方程式で記述されるのではないか、と考えられるかも知れない。しかし測定は、かかる客観的・物理的に記述されない要素を含んでいる。シュレーディンガー方程式による連続的・一義的可逆的な変化は（たとえHの時間変化を考慮しても）測定過程の真実相を全面的に表現することはできないのである。われわれはその説明に移るであろう。

これを要するにわれわれには「状態」の概念がしだいに浮び出て来る。状態は、まず最大可能な測定によって完全に決定されるという点で、特殊な時間におけるその系についての Summe von

Kenntnissen「知識の総和」以上のものではない。したがってシュレーディンガー方程式を媒介としてそれの時間的変化が追求されるといっても、一種の mathematical causality〔数学的因果性〕であり、古典力学におけるごとき直接観測と結びついた propagation ではない。シュレーディンガーのいわゆる「Erwartungskatalog〔予測目録〕」という表現の意味するところである。

(1) これでシュレーディンガーとヒルベルトらとがヒルベルト空間幾何学の両側面から出発したことが判然した。
(2) *ZS. f. Phys.* 87, S. 505 (1933)
〔1〕 選集版では「ただちに示す……」。
〔2〕 以上の記述は主として Dirac, *P. QM.* 2nd. ed. p. 18 によったものであるが、1st ed. p. 8-9 では相対論への移行を考慮して、「状態」を四次元的に考えていた。
〔3〕 選集版では、「……を覆滅することがある」。
〔4〕 選集版では、「Schrödinger のいふ如く前者測定結果の……」。
〔5〕 選集版では、「……過去の状態の關係……」。
〔6〕 選集版では「……將來の理論は今日……」。
〔7〕 J. v. Neumann, *Gött. Nachr.* (1927) S. 1 u. S. 245

§ 17 観測と統計

量子力学の演算場、抽象的ヒルベルト空間は、一般に無限次元のウニテール〔ユニタリー〕空間であるから、相対性理論の場合のごとくレアルな直観的意味はない。

しかしいま理解を具体化するために、あたかも三次元空間のごとき図でこれを示してみよう。[1]すべて〔の〕量子物理的量は、それぞれ一つのテンソルで表わされ、その主軸の方向はちょうど剛体の慣性能率のテンソルのごとく左図のように表わされる。

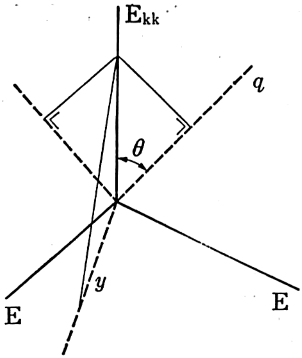
この主軸の方向は一般に各々の量子論的量によって異なり、可換なマトリックス（ないし演算子）のみが同じ方向をもっている。ある一つの量子論的量を正確に知ることは、ヒルベルト空間内ではっきり決まった方向を確定すること、すなわち射線方向を決定することに相当する。（この際Entartung〔縮退〕はないと仮定する。）これは、その量が決まった値をもつような状態を代表する方向と考えても差支えない。

さて、ウニテール空間で（位相の因子を除き）正確に方向を決定することは、その量子論的量の知識を最高限度まで精確に知ることを意味し、前述の純粋状態に相当する定まった（entarten〔縮

退〕していない）定常状態にある原子は純粋状態にあり、それに特徴的な方向は、その定常状態のエネルギーE_{kk}に属するテンソルEの主軸kの方向をもつ。この方向における変数pやqの値は何かと問うことはまったく意味をなさない。Eと同じ主軸方向のテンソルで代表される物理的量のみがこの方向で一定の値をもっている。たとえば〔原子の〕総角運動量能率は、エネルギーと同方向で同時に決定される。もしqの値を測ろうとすれば、Eの主軸に相当した諸方向（q_{11}、q_{22}……、q_{nn}……）の一定の確率を備えた混合状態 Gemenge と考うべきものが生じる。

$$\Psi_{kk}E \to S_{k1}\varphi_{q11}+S_{k2}\varphi_{q22}+S_{k3}\varphi_{q33}+\cdots\cdots+S_{kn}\varphi_{qnn}+\cdots\cdots$$

たとえば、顕微鏡による位置観測の例をとれば、コンプトン効果の衝撃〔つまり反跳〕の結果の不確実な部分は、この純粋状態E_{kk}をかかる混合状態へ変じてしまう。ところが、この混合状態は、qの主軸の諸方向の適当な確率の重み[1]をもっての混合状態と考えられる。かく出来上った混合状態中から、実際におこなった測定は、その結果として、ある一つのきまった方向値q_{nn}を取り出すのである。



さて、このEが測定されてE_{kk}を得たのち、qを測定してq_{nn}を得る確率は、初めのEの方向とqの方向のあいだの「コサインの平方」、正しくはウニテール空間でこのコサインの平方に相当するアナローゴン、すなわち変換函数の modulus〔係数〕の平方 $|S(E,q)|^2$ で与えられる。この仮定は一般に量子力学の根本的な Postulate の一つであり、Axiom〔公理〕であるから、

したがってこれをさらに基礎づけることはできないと考えられている。ただしW・パウリは、「つまりこれはE_{kk}からq_{11}……q_{nn}……への射影の係数に相当する。ユークリッド幾何学的には射影であり、これをオペレーター算法として表現するところに、すなわち一種の抽象的射影幾何学としての量子力学の算法を特徴づけるものがある」〔とする〕。これを論理命題化せんとするノイマンの試みもこれから理解の初歩を見出しうる。

以上Eとqについて詳細に述べたことをまとめて一般的に言えば、二つの量子論的量の値は、この二つの量に相当するテンソルが平行な主軸を有する場合に限って、その間に因果的な（より適切には一義的函数）関係が存し、主軸が平行でなければかかる一義的連関は存しない。

主軸が平行でない場合には前述のとおり、確率の重みをもってする統計的連関があるのであるが、その統計的連関も、対象たる系に an und für sich に実現されているわけではない点に特別デリケートな注意を要する。たとえば、上に述べた例で、系のEがE_{kk}にあることが知れている場合、その系のqはそれ自身において客観的に$|S_{kr}|^2_{r=1\cdots\cdots n\cdots\cdots}$なる分布にあるわけではなく、また、そのいずれか一つのqに確率$|S_{kr}|^2$をもって存するわけでもない。われわれは、水素原子中の電子の分布は、もしも$|\Psi|^2$をとるとその縁辺の部分で次の運動エネルギーを考えねばならぬという不合理の生ずることを述べた。その場合、これがコンプトン効果のごとき測定手段とのエネルギー交換によって説明せられたとおり、E_{kk}から$S_{k1}q_{11}+\cdots\cdots+S_{kn}q_{nn}$に移るには$q$を測定するための測定手段が系に擾乱を及ぼすことが必要であり、この擾乱によってのみパラドックスから脱出しうるのである。ただEの値とqの測定値との確率的連関、つまりSなる函数はその系によって規定されてい

て、これは測定値からは独立なのである。したがってE_{kk}なる測定値に対し分布 $S_1q_1+\cdots\cdots+S_nq_n$ はどこまでも可能分布にとどまり、測定をまたずしては一片の現実性をもたないのである。

しかしあらゆる測定において、あらかじめないものを測定することに意味があろうか。その意味で状態を表わす波動函数Ψをシュレーディンガーは Erwartungskatalog（予測目録）といった。

以上のごとき解明分析を経るならば「量子力学の最も興味ある問題」とも称せられる「波堆の収縮 Reduktion der Wellenpakete」も了解に難くないであろう。すでに以前に波動函数の解釈の箇所（§12）で述べたとおり、測定は瞬間にして（超光速度をもって）波動函数を収縮せしめる。それがエネルギーの伝達をともなう物理的過程でありえないことはかつて述べたとおりである。いまやその意味は完全に明らかとなる。そもそも物理的量Rの測定とは、一般に量Rの値が全然知られていないか、もしくは不精確にしか知られていない場合に、測定によってこれをより精確に知るとき初めて意味を有する。この測定過程は上述の説明からして二つの明確に区別すべき階級から成る。

第一段は、系を外部的な物理的にレアルな事態の客観的経過を擾すような（「擾す」というのは主観的な知識を前提とした秩序の概念が入っていて差支えがあれば、「変える」でもよい）作用のもとにおく。この作用は、いかなる物理的量を測らんとするかによって定まった、測定装置の系に対する作用にほかならぬ。たとえば、光による照射とか、電場（または磁場）を挿入することである。この作用の結果として（また目的として）、被観測系は多くの（一般には無限に多くの）諸状態の混合集団に化するが、これら多くの状態はいずれも量Rの値が以前より精確に得られるという点ではいずれも同様である。ここで波動函数は一般に拡散した状態にある。

第二段は、かかる無限に多くの可能性の混合中から一つのはっきり決まったRの値を事実実現されたものとして取り出すのである。しかしこの第二段階は観測という出来事の過程になんら影響を及ぼす過程ではなく、単に実際起こったことについてのわれわれの知識を限定するのみであり、しかしここにその他の値の可能性は消失し、一瞬にして、飛躍的に**波動函数は収縮する！**　これが今日一般に承認されている考え方である。

量子力学の取扱いは——いな、現在の予想では数学的理論一般が（第一次的な対象として）取り扱いうるのは——以上の測定の二つの段階の第一段階のみである。数学的理論としての量子力学においては系のすべての時間的変化は連続的に推移する。可能性としての「予測目録」を記述するにすぎない波動函数は、飛躍の過程には発言権をもたない。パウリが「量子力学は、厳密に言えば（不連続的な）過程なる概念を関知しない」と世俗的概念にパラドキシカルに説くのもこの意味である。[2]

この「目録」を実現し、系が実際にいかなる状態へ転移したかを確定するのは、測定の第二段階である。この物理的事実の確定は、観測の対象たる系のうちに入れていない観測者（ないし記録装置）によっておこなわれる現実的確定であり、単に統計的可能性[2]（固有値とその確率）のみを記述する数学的公式主義の立場からはあらかじめ自然法則的に決定しえないアクトである。このアクトにおいて予測目録からただ一つの値が実現され、他の値は不可能となるので、波堆は一瞬にして収縮する。この「飛躍」は対象的な自然過程ではないので、因果的でなくかえって測定の「結果」に依存する。これがいわゆる不連続性の本質である。[3]　経過（ママ）において（作用量子の有限性のために）観測の対象と手段との交互作用の細目を分離してみるために生じたのである。

しかしこれについては、さらにいちだんと精密な考察を要するのであろう。われわれは次にこれを論じよう。[4]

われわれは従来、観測される対象として、暗々裡に、通常量子力学が取り扱うような原子や分子、電子等を考えてきた。しかし一般に粗大な物体等も原子、分子から成るとすれば、観測装置も原理的には量子力学によって取り扱いうるものでなければならない。もししからずとすれば、量子力学は自然法則としての一般的意義を要求することはできない。およそ物理学の対象たる自然のいかなる部分に対しても成立する理論と言うことはできなくなる。あるいは逆に、観測対象も装置もともに電子あるいはその他の基本的粒子の体系であることを考えれば、それらの合成系のハミルトニアンが、ノイマンの無矛盾性の証明に用いられたような一般的なものに比べて、制限されたものになる可能性はなくもない。しかしこのことは量子力学そのものの内部矛盾というより、その相対論的量子力学または素粒子論への発展の契機としてみられるべきであろう。

以上に詳説したごとく、量子力学においても、対象たる二つの系の相互間の交互作用の影響は、シュレーディンガー方程式にしたがい連続的に、いわば「因果的」に経過し――これは一方の系が観測器械のごときもので、それが量子力学の対象として取り扱われているかぎり、なんら本質的な変化をきたさない――、状態の「非因果的」飛躍的変化なるものは、対象の外に立ち、対象に含まれていない観測器械をもって測定者が測定値の読みを取るがために起こるのである。

結局、測定の際には系が完全な閉鎖した系ではありえないために、この因果性の要求が貫徹されないのである。だがかく言うことは、あるいは次のような思想を想起するかもしれない。

「因果連鎖の追究が不可能になるのは、系の外部に立つ観測装置および観測者の作用のためであるとすれば、この観測者等を含め、いな、宇宙の全体を一丸として、これを量子力学的対象と見なし、これについてシュレーディンガーの方程式をつくれば、その時間的変化はまさに因果的で、いっさいの未来は決定されている。すなわち、量子力学がその対象を自然の連関(実際に存する交互作用)を無視して、単に思想の上で人為的に切り離し孤立せしめ、それへ外部から加わる擾乱を正当に取り入れないためである」と。

「ちょうど、観測の際の量子力学的系は、古典力学の incomplete system 〔不完全系〕のようなもので、これを完全に扱うには天体力学の摂動論に相当する労力が必要である。この労力をはらわずして因果的記述を放棄するのは『軽卒にして怠慢』ではないか」(Silberstein; *Causality, a maxim* (一九三三))。

「観測作用の擾乱を観測するにはさらに他の観測装置を要し、regressus ad infinitum 〔際限のない退行〕となる」と言う批難に対えるには、「宇宙全体の物質に関するシュレーディンガー方程式をつくり、完結した undisturbed whole 〔擾乱されていない全体〕を得れば、もはや外部に残る擾乱者はないので、少なくとも理論上は因果律の厳密な成立を期待しうるではないか。観測の交互作用をも含めた「Ganzheit 〔全体性〕の理念の必要こそ最近の物理学の一特質である」と。

だが、いっさいの測定を拒否し、具体的数値を読み取る可能性なき宇宙全体のシュレーディンガー方程式〔も〕、ラプラスの「巨大なインテリジェンス」〔の亜流たる点に変りはない〕[3]、この方程式完結の瞬間に、物理学は化して単なる数学的図式に堕するのである。[5]

(1) Heisenberg, *Die physikalische Prinzipien der Quantentheorie* (1930) S. 42

(2) W. Pauli, *P. W. S.* 161 これはすでにゾムマーフェルトへの Festschritt, *Problem der modernen Physik*, S. 30—45 (1928) のうちでも説かれたことである。注意すべきはここでは「過程」が問題になっているのでエネルギー準位等の不連続性はもちろん量子力学の独特の領域である。不連続 - 連続の量子力学による止揚については Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*, S. 208 参照。
時間・空間の最小単位を認めて不連続的時空論を構成せんとするG・T・ボクロフスキ、ゴットフリート・ベックなど多数の試みは、相対論的に universale kleinste Länge の存在が否定せられる以上見込みはないであろう (Pauli, *P. W.* S. 243 参照)。

(3) W. Pauli; *Die allgemeine Prinzipien der Wellenmechanik*

(4) この点についてはノイマンにより徹底的に研究され、波堆の reduktion による測定過程の成立の無矛盾性が、観測対象と観測手段の分離面の相対性にもかかわらず保証されることが示されている (Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, S. 222 以下参照)。

(5) Heisenberg, *Die physikalische Prinzipien der Quantentheorie* (1930) S. 44 に生彩に富んだ叙述がある。

〔1〕 選集版では、「……確率係数……」。

〔2〕 選集版では、「…… (固有値としての確率) ……」。

〔3〕 選集版では、「……、Laplace、巨大な intelligence、も、……」。

§18 相反補足性 Komplementarität

量子的現象の取扱いでは、ある点に達すると直観的なモデルが無効になり、時間空間的記述を徹底させることができないことは、ボーアらによって力説せられたとおりであり、ハイゼンベルクの方法の出発点であった。これによって量子力学の抽象性はやむをえざるものとして弁護せられ、直観性を諦めることとそのことがまさに新たなる現象領域の法則性の探究への自由を約束するものと言われた。これはすでに前章において縷説したとおりである。他方において物理学はその実験との連関上、必然的にある程度までは空間時間の直観的概念を要し、これを欠くときはまさにその現実的根拠を奪われて、一片の単なる数学的観念体系と化するほかはない。しかしながら一方において直観性の断念が必然的であり、他方において直観性が不可欠であるということは、少なくとも論理的には一つの裁決を要求する問題である。この矛盾が物理学にとって致命的アポリアであるか、それともじつは外見的な矛盾にすぎないものであるかは事態の深刻な解剖にまたなければならない。しかして、この点こそ量子力学が呈出した最も重要にして、最も特色ある哲学的問題の核心であり、粒子－波動の Dualismus〔二重性〕、観測対象と観測者との交錯、因果性と偶然性等のあまたの難

問も、その源をここに発し、それらの根本的解決はこのアポリアの解決に帰するのである。したがって問題の重要性に鑑み、われわれはさらに詳細にこの対立を叙述し、しだいに問題の核心に集中接近しなければならない。

量子力学の創唱の際におけるハイゼンベルクの方法論的考察は、われわれが日常生活の卑近な経験からとりきたった概念を、経験によって十分基礎づけられていない領域へ無意識的・無批判的に拡張し一般化することによって、矛盾に陥る危険を闡明してきわめて印象的な成功をおさめた。それによって量子現象においては、古典運動学の基礎概念たる位置や速度の概念は本質的な制限をこうむることになった。そこで次のような思想が起こるのはきわめて自然であろう。すなわち「物理学の理論に絶対的に確実な基礎を創らんがために、徹底的に経験的に基礎づけられた概念のみを現象の記述に用いる」[1]ことである。これがためにはあらゆる科学以前に、まず「すべての曖昧な概念から言語を浄化する」という手段も考えられよう[2]。事実R・カルナップらの記号的な論理学 Logik-kalkül のごときはこうした意図を多分に潜めている。しかし、かかるプログラムは、ハイゼンベルクの指摘によればとうてい遂行不可能である。「なぜならば、かくてはきわめて、単純卑近な概念といえども、いちいち改訂を免れず、われわれの言語はほとんど残るところなく失われてしまうであろうからである。さらに、ある一つの概念を用いて危険がないかどうかをまえもって判別すべき規準など存在するであろうか。なんらかの論理的方法で、科学以前に概念を闡明しておこうとする要求は、あらゆる未来にわたる科学の発展を単なる論理的分析で予定してしまうのと同じことでは

ないか」。かくてこの極端なる実証主義的な方法論は空虚なる試みに終わらざるをえないのである。

これと相似の主張は、旧来の直観的空間－時間的世界から借りきたったいっさいの言葉を排し、量子力学の新しい数学的関係に即応して、まったく非直観的な新しい概念を構成することによって、ないし「Eigenwert〔固有値〕」のごとき数学的用語を従来の力学的概念に転釈せずに用い、困難を避けようとするものである。たとえば因果律のごときも、これらの新概念によれば正当に保存されるのではないかという期待と結びつける人もある。この意見は一見きわめて進歩的であり徹底しているように見える。しかしこれは事態の誤解に基づいている。(3) われわれはパウリとともに言わなければならぬ。「あまりにも保守的な傾向に対して近代物理学の立場を境界づけたのちには、他方あまりにも破壊的な傾向に対しても境界を画さなければならない」(4) と。数学の抽象的形式に幻惑されて物理学の現実性を見落とすことは許されない。

われわれはすでにシュレーディンガーが「実験物理学が直観的な問題を提起している」と指摘したことを述べた。このシュレーディンガーの着眼は不幸にも、波動力学の誤れる「直観性」の擁護に利用されたために、その不成功ののちは彼自身としてはかえって反対の方向に進んだのであるが、やがてボーア－ハイゼンベルクによって新たなる照明の下にもたらされることとなった。ボーアは一九二七年コモの講演で「厳密に言えば観測の概念は因果的－空間時間的記述法に属している」ことを注意し、(5) しかも不確定関係に表現された不確定度を考慮することによってこの概念を量子論で矛盾なく用いうると述べたが、その後この考察はしだいに積極的に深められるに至った。「直観形式は日常経験の理想化であり、そのかぎり、これを原子的領域に適用する場合に制限を受けること

も必要となったが、かかる制限にもかかわらず、われわれは直観形式を欠くことはできない。結局それをもってすべての経験が表現され、それによってすべての言葉が色づけられるのである。(6)」

人は、物理学で使用される概念が経験的に基礎づけられねばならぬ点を強調したが、物理学における経験は観測であり測定であることに思いいたるならば、観測が前提する諸概念は量子論においてもこれを除去することはできない。しかるに観測は必然的に時間空間的操作であり、観測の結果が古典理論における意味で記述、了解されるためには、直観的な日常の概念をもって記述、解釈されなければならない。かくて実験の条件と測定の結果の記述、了解には日常の概念にたよらざるをえず、この日常の概念の精確な理想化された形態が、古典理論において定義された概念にほかならない。この意味で古典的概念は測定の本質から要求されたものであり、この意味においてそれは、すべての精密にして客観的な自然科学の基礎的前提をなすものである。(7)

人は古典力学の「法則」が量子論的法則の単に近似的な表現にすぎないという概念をあまりに広い意味にとってはならない。なるほど多くの古典的法則は量子論的法則から $h \to 0$ の極限で得られるには違いない。しかし、これは古典的法則が不正確なる贅物であって量子論的法則があればそれは当然含まれていると考うべきではないであろう。量子論のシンボルと古典的概念のあいだには、かかる極限移行で連続的に到達することができない異質性がある。両者のあいだには質的断絶がある。ここで回顧するとき、量子力学の抽象的形式はそのままでは古典力学の修正や建直しではなく、古典物理学の対象領域たる直接的な現実性、Umwelt〔外界〕から対象化された Vorhandensein〔現在する事物〕の数学的・客観的・直接的描写たることの全面的否定であったことの意味が明らか

となる。[7] すなわち量子論のシンボル、q－数で表現される法則性から古典法則をその統計的平均として把握するのはじつは一つの根本的なポステュレートであり、このポステュレートが必然不可欠であること自身が、じつは量子論的シムボリークが古典概念をまってはじめて物理的意義を獲得することを意味するのである。「古典概念によって〔量子論的な〕抽象的シンボルと経験との架橋が可能にされるのである。元来、作用量子の不可分性の認識、およびその大きさの測定そのものが、測定の古典概念に基づく分析に由来する。[8]」かくて「古典概念を欠いては物理的問題というものがありえないことになるのである[7]」。

さて以上のごとく物理学に直観的な概念が必須なことはほとんど自明であり、量子論でとくにこれを取り上げるのは不可解と見えるかも知れない。人は古典力学が日常生活の直接的な経験に比して抽象的であることと量子論の抽象性も程度上の差異ではないか、かかる自明な事実を誇張して、古典概念のあいだに生じるパラドックス、不確定関係や、つづいて述べる相補性原理に、ボーアやハイゼンベルクのごとく過大の意義を与える根拠としてはならないと論じるかも知れない。シュレーディンガーや、これとは異なる立場ではあるがわが国の一部の学者のあいだにもこれに類する見解が見られる。かような見解は一見するともっともな批評に思えるが、量子論と古典理論の抽象性を単に抽象性の程度という見地から考察し、いわば量的な差異にのみ着目して、両者の抽象性のあいだに存する質的な飛躍を十分明瞭にしていない憾(うら)みがある。

古典力学の概念構成は、日常生活の経験のうち、多かれ少なかれ機械的・技術的な側面を秩序立てる位置、時間、速度、質量等のごとき表象を理想化したものと言える。すなわち、その経験対象

は空間時間内における客観的な過程であり、この客観性を保証すべく因果性が前提される。これは、その世界をわれわれの主観的体験から独立に記述することを理想としているのである。カントがニュートン物理学を模範とし、科学的経験の対象として取り上げた世界が、これであった。カントがこれの世界をとくにニュートン物理学の世界として記述せず、一般に経験的対象の領域と考えていた事実からも推測できるとおり、われわれは古典物理学によって構造作用を規定された測定装置を操作するになんら別世界を結びつける必要はなく、経験の対象と古典物理学の対象のあいだにいわば一対一の対応があり、理想化による概念の修正も色あせただけで、topological〔位相的〕にはinvariant〔不変〕であるといえよう。

しかし、量子論の数学的内容、q－数を用いて表現される諸関係は、そのままではけっして経験の対象と一義的に結びつかない。いな、いかなる現実とも関係づけることができない。われわれが一定の演算方式にしたがってそれからc－数を導くこと、しかしてこれを測定すべき手段と関係づけることのみが経験との接触である。この測定こそ、古典的な概念で客観的に記述される測定器械をもってのみおこないうるのである。これは測定器械と呼ばれる装置の全体が、隅々までニュートン物理学で十分に記述されるという意味ではない。われわれが測定装置のなかに真空管増幅装置や、さらに個別的な原子的過程を予想するような、たとえば中性子検出に人口放射能を利用するというような部分を取り入れること、また被観測現象との関連が単に確率的・統計的であることもなんら矛盾しない。事実、今日の原子物理学の実験装置の大部分はニュートンの知らなかった部分を含んでいる。そして上の例においても、われわれは量子論的関係の非直観性にもかかわらず、実験結果

との叙述としては「人工放射能でこの時この場所に中性子（すなわち一定の物）が見出された」というような表現形式を取らねばならぬ。したがって数学的諸関係が単にそれのみとしてでなく、物理的意義を得るためにはつねに古典的概念への翻訳が不可欠であり、かくてふたたび空間時間－因果性の古典的概念なくしては全然物理的問題は存在しないといわれねばならない。

しかしながらかかる反省、すなわち量子物理学において古典的概念が不可欠であるという事実のうちに量子力学の論理的非独立性、非完結性を認め、これをもって量子力学を低く評価するものと考えるのは、そもそも量子力学の意義を不当に拡大し、物理学の理論がもつ意義について依然として旧時代的観念から脱却せず、自然科学に形而上学的な自足的な客観的現象の直接の記述を思い込んでいるためにほかならない。量子力学はまえから説いているように、与えられた実験条件のもとで一定状態の対象についておこなわれる実験結果を算出する計算手段にほかならないことが、ここで再確認されなければならない。

いったい研究対象が古典物理学では十分記述されない場合にもこれが観測の手段たる測定器械が依然として古典的に取り扱われねばならぬことは、相対性理論の場合にも問題となったことである。たとえばH・ディングラーのごとき学者は、これから相対性理論の自己矛盾を論結して、誤った路に入り込んだが、われわれの問題とするのはこの行き過ぎた結論ではない。一般相対性理論においてその実験的検証のために太陽による光線の屈曲を測定してユークリッド幾何学からの偏差を決定すべき測定器械それ自身としては、ユークリッド幾何学の妥当性を前提して製作されなければならぬ。これが製作に際しては時間と空間は截然と区別されて、相対性理論の固有特質たる時間と空間

との融合はこの際には問題の外におかれるのである。

さてかようにして、測定器械から実験結果を得るのにそれを時間空間内における客観的事実として表現しなければならないとすれば、その客観性の必然的契機としての因果性が予定されている。測定器械のごとき粗視的対象は、われわれが物質（それが結局原子的構成をもつことはもちろんであるが）の集団を因果的に規制されたものとして時間‐空間的図式のもとに把握することによって成立する。われわれが自己の身体の延長として多かれ少なかれ道具的な存在として身体に同化す〔させ?〕るとき、原子集団は粗視的な対象となり、測定器械と同様の意味での存在の平面に統一される。かく科学的経験の対象として規定された客観的事物は空間‐時間的直観性を媒介として認識されるといわねばならない。

以上のごとき分析ののちには、カント以来しばしば哲学的論争の的となった直観形式と範疇の先天性 Apriorität の問題も自ら新しい照明を得ることになる。相対性理論において絶対時間とユークリッド空間が、量子論において因果律が批判せられた結果、われわれ〔は〕空間時間の直観形式および因果性の範疇なるものは、もはやあらゆる未来にわたって物理学の理論的内容に対して不可欠な成分をなすものだと言えなくなった。カントは正当にも知覚の客観性の可能性を因果連関性の要請に結びつけたが、「現代の原子物理学は主観と客観とへ画然と世界を二分するという意味での客観的物理学は不可能になったから、カントの主張をそのまま継承することは不適当である」とはハイゼンベルクがこの哲人の思索した町ケーニヒスベルクで試みた講演（一九三〇）の一節[1]である。けだし理論の内容的要素としてカントが措定し、後人が理解したかぎりの、時間‐因果性のアプリ

オリ、これはニュートン物理学を内容的に固執永遠化したものであり、その後の理論の飛躍発展をたすけるよりはむしろ阻害したとさえ言いうるであろう。

かくハイゼンベルクが事態の認識論的分析を深めるにつれてカントの見解の破壊的批判から、その意義を生かすにいたったことは興味あることである。「しかも一方において自然科学が経験の客観性を欠くことができない以上、現代物理学においても依然として直観形式と因果性は物理学的研究の前提である。なんとなればある一つの測定の経過と結果を mitteilen〔伝達〕するには、それに必要な操作と指針の読みを客観的な、われわれの直観の空間内でおこなわれる過程として記述するほかはなく、また測定結果から観測された客観の諸性質へ推論するには因果律が両者の一義的連関を保証することなくしてはできないからである。(9)」「また、測定器械は古典理論に言われる意味で決定されている determinant〔である〕ことが測定の前提でなければならない」。「かく見きたるとき、精密自然科学に『ア・プリオリ』のイデーがいかなる意味で、いかなる制限のもとに保存されているかは、カントの時代よりもはるかに明らかになった。(9)」それは測定が実践的・身体的行為であり、人間と対象とのあいだの道具を媒介する交渉であるかぎりにおいて、時空因果性を必然的に前提するのであるが、このア・プリオリは超歴史的・形而上学的な固定したものではなく、また理論的形式の内容がそのまま時空因果関係の規定たることを意味するものでもない。

ボーア、ハイゼンベルクはこの事態をしばしば、測定における古典概念の必要という言葉で語っているが、古典概念というのは古典物理学の概念が上述のごとく、この実践的取扱いの典型的な理

想化であるという歴史的な事情によるもので、要は測定が実践的操作と結果の客観的記述の前提となればよいのであって、あえて復古主義を唱えるものでないことを注意したいのである。

J・v・ノイマンの量子力学の数学的基礎に関する諸研究は、きわめて精確厳正なもので、その功績を没するわけにいかないが、しかし彼がそのようにして得られた数学的形式から物理的ないし自然哲学的な結論を下すときには、しばしば首肯しがたいものがある。上に論じてきたった粗視的概念の本質、測定器械の合法則性等については、遺憾ながら彼の所論は、それが数学的に厳密であるだけ、それだけ人を誤らせると考えざるをえない。ノイマンはさきに述べた無分散が存在しえないという数学的証明の結論として因果性に関するシュレーディンガーの見解[2]に賛意を表し、「粗視的に等しい原因が粗視的に等しい結果を生ずるという経験的事実は因果性の問題に何の関係もない。それは『大数の法則』の結果として、要素過程を支配する(すなわち実際の)自然法則が因果的なるやいなやには無関係だからである。すでにブラウン運動その他においてこの外見的の粗視的因果性は破れている。原子的・要素的過程そのものにおいてこそはじめて因果性の問題を正しく検討することができる」が、彼の証明によれば「量子力学は因果性とは否応なしに論理的に矛盾する」から、いやしくも量子力学がその大要において正しいことを認めるかぎり、自然因果性は否定されるというのである〔M. G. QM.〕。

このノイマンの考え方は前記シュレーディンガーのほかR・v・ミーゼスの「自然法則はすべて統計的・確率的法則にすぎない」とする見地ないしその亜流としての「厳密な因果性の成立は統計的

に得られる法則性と論理的に矛盾する」とするポパーの見地とも通じるものであるが、ヨルダンも指摘したごとく、ポパーの見解は、J・v・ノイマン自身とG・バーコフによって Quasiergodensatz〔準エルゴート定理〕が証明された以上誤りであるし、ノイマンもミーゼスも実証主義的な立場に立ちながら、形而上学的な概念である要素的過程そのものが確率的であり非因果的であるとして不決定論を主張するのは、つねに観測しうべき事実についてのみ論ずべき量子力学の立場とはかえって縁なき領域への論理的な越境である。もっともノイマンののちの論文によれば「pre-determinism〔事前決定論〕の廃棄と簡単に言えない」とあるところによれば、あるいは彼もこれに気づいているのかも知れない。かくノイマン〔に〕は物理的測定の直観的・粗視的な器械をもっておこなわれる事実の十分な認識が欠けているように思われる。これは彼の有名な「測定過程」の数学的理論にもまた反映している。ボーアは一九三七年東京における講演でも、測定器械が古典概念で記述されなければならない点を強調し、「ノイマンの測定論はともすればこの点を看過せしめる怖れがあるから危険である」と述べて、ノイマンの理論を援用して古典概念の必然性に疑いをいだいていた学者の先手を打った観〔感〕があった。もちろんボーアはノイマンの理論が誤りだと言うのではないことはのちに注意していたが、われわれは少なくとも測定の物理的前提に関する彼〔ノイマン〕の説明は不完全なものであり、誤解の因子を含んでいると思う。

彼は測定過程を一応は対象（I）と測定器械（Ⅱ）と観測者（Ⅲ）に分けている。通常の場合、観測対象と観測者との限界は（I）と（Ⅱ＋Ⅲ）のあいだに引かれるが、この限界は（I＋Ⅱ）と（Ⅲ）とのあいだにも移しうる。すなわち本来の対象と測定器械とを合成した場合（I＋Ⅱ）、これに対

立して測定するものとして直察(ママ)観測者を考えている。この場合新たに別の測定器械を導入することをしない。これは彼が究極的には観測者は抽象的な Ich〔自己〕にまで遡りえ、これと網膜、神経通路、脳を含めてのいっさいの「他者」を対象中に含ませうると明言しているのでも明らかである。

しかしすでに従来見たごとく物理学的の測定をおこなうものは抽象的な Ich、いわゆる認識論的な主観のごときものでありえない。どこまでも観測器械ないしこれにかかわる時間空間的存在を媒介せねばならぬ。しからざれば物理学の理論形式はいかなる解釈も不可能である。（Ⅰ＋Ⅱ）に対しては（Ⅲ）が対立するのではなく、新しき測定装置（Ⅱ′）を含めて（Ⅱ′＋Ⅲ）が対立せねばならぬ。

さらにまた、ノイマンの測定に対する物理的解釈の不十分さは、直接測定プロセス（Ⅰ）の統計的性格の検討にもあらわれている。v・ノイマンは、「測定対象が測定のまえに純粋状態Ψにあるとき、その測定結果が分散し対象が混合状態 Gemisch になるのを、観測者が自己自身の状態を完全には知らないために、その観測者の混合状態的（統計的）性格が測定過程中の交互作用により対象に伝染せるのである。すなわち測定の結果、測定のまえの観測者（装置）の状態が正確に知れないから不確定になるという解釈は誤りである」と論じる。「観測者の自己状態についての知識には自然法則的に限界があるから、いかような機構も考えられないが、それは数学的理論のうえから否定される」と言うのである〔以上 *M. G. QM.*〕。

ノイマンは自ら不決定論者として、はなはだ数学的に特殊化されてはいるが、おそらくはプランクがしばしば表明する解釈を難じているものと思われるが、一面において、ボーア、ハイゼンベルクの観測による不可制御的擾乱という概念を批評したものともみられよう。しかし彼が批評の数学

的根拠とするところははなはだしく単純なものである。ノイマンの意見では「観測者の自己状態の知識の限度は、測定後の混合状態を構成するそれぞれの要素的状態の頻度（重み）w_nで表現されるが、対象の状態は完全に決定されているから、この頻度は観測者のみに依存し、初めの対象の状態には無関係である。したがって直接観測過程、プロセス（Ⅰ）の非因果性は観測者の状態についての知識が不完全なためではない」。かくノイマンは結論し、以後は観測者の状態も正確に知れたものとして数学的理論の展開に向かっている。しかしわれわれが量子力学における系の状態Ψから変換理論によってw_nを求める場合、じつは観測者の不可制御的擾乱が含蓄されていることはまえに見たところである。なお頻度w_nが初めの状態に無関係であるということは、観測者による擾乱を考える立場からしても論理的必然性をもって結びつけるわけにはいかない〔が、その〕ことはしばらく措くとしても、ここでノイマンの形式主義が破たんを示していることは明らかである。

（1） Heisenberg, *P. QT.* S. 1
（2） Heisenberg, *Wandl.* S. 49
（3） Heisenberg, *Naturwiss.* 17, S. 494 (1929), N. Bohr, *AT. NB.* S.10 または *Erkenntnis.* 6, S.298 (1936)。
（4） W. Pauli, *Scientia* 59, S. 65 (1936)
（5） N. Bohr, *AT. NB.* S. 44
（6） N. Bohr 前掲 S.3 なお、カント、純粋理性批判も参照。
（7） Heisenberg, *Nobelvortrag* (1933), *Die Entwicklung der Quantenmechanik*, S.14
（8） Bohr 前掲 S.10。
（9） Heisenberg, *Wandl.* S. 18—19
〔1〕 Heisenberg, *Erkenntnis* 2, S.172
〔2〕 *Naturwiss.* 17 (1929), S.9

§19　相反補足性の概念

測定における「古典的」概念の不可欠性について、以上においてわれわれは理論の歴史的発展からやや横道にそれて、あまりに詳細な分析をおこなったかも知れない。しかしその理解はボーアが一九二七年以来説ききたった Komplementarität〔相反補足性〕の概念を全面的に把握するためにはぜひとも必要であると思う。

さて量子力学における古典的概念の根本的制限とその結果としての理論の非直観的抽象性と実験的手段の古典的概念への依存とのきわめて特徴ある矛盾[1]は、前節の詳細な分析により自ら解決の道を見出すのである。われわれは理論的には原子的な対象は[1]量子力学の形式で記述され、実験上取り扱う測定器械が古典的概念で記述されることを知った。そこでわれわれは、測定にあたって、まず測定さるべき対象と測定器械とを区別して考えねばならぬ。対象と器械とのあいだには、観念的に一つの境界線が引かれなければならない。これがハイゼンベルクのいわゆる切断 Schnitt である。もちろん原子的対象と測定装置との区別は多くの場合は、一方は原子的であり他は粗視的であるから、ほとんど深い反省を要せずして明らかであるが、場合により、われわれの問題の立て方である

程度までこの境界線はずらすことができ、ある場合には測定装置の一端をなした部分を、他の場合には対象そのものを、系の一部と考えることもありうるわけである。量子力学がこの場合きわめて明晰なる解答を与え、毫も矛盾をきたさぬことはすでに§18に述べたところであった。しかして古典的概念によって定式化された測定器械を支配する法則は、量子力学法則から$h\longrightarrow 0$の極限の場合として含まれるものである。したがってハイゼンベルクの切断は自然を人為的に二分してしまうと非難することは当たらない。自然的過程として両者のあいだに質的不連続性が存するとは考えないのである。しかも理論的記述の非直観性と実験操作の直観性とはこの切断を不可避のものとせざるをえない。「この切断の両面においてはすべての連関は厳密に画然と決定されている」が、それはハイゼンベルクの言葉を借りれば「此方は古典物理学の法則により、彼方は量子力学の波動方程式によってである[2]」。しかも「切断の存在は両者間の統計的関連となってあらわれる」。すなわち「切断の箇所における観測手段の観測対象への作用は、少なくとも部分的には原理的に制御しがたい擾乱として了解するほかはない」のである。「この原理上不可制御的な擾乱の概念によってのみ、古典的概念が自然記述に用いられる限度は不確定関係によって限定されるということも矛盾でなくなり、かくて古典表象からその限度において解放され、古典的には両立しがたい粒子像・波動像を問題に応じて用いうる〔ことになる〕のである[3]。」[2]

しかしながら、理論の抽象的形式と、測定器械から直接観られる空間的・時間的経験所与とのあいだの関係は、単に統計的というだけでは尽しえないきわめて特異な現実的制約を受けている。

そもそも、量子力学において物理的量を表現する演算子は対応論的に物理的意義を与えられ〔た

ものであっ」て、〔その〕古典理論からの意味づけは、どこまでも歴史的習慣と教育的な意義しかなく、これは単なるアナロギー以上の何ものでもない。人あるいは量子力学的量としてのエネルギー・マトリックスや運動量演算子に固有函数、固有値等はなんら直観的内容を要求する必要はなく、物理学的概念として抽象的なままでよいであろうと論じるかも知れない。しかしこれは物理学を机上の計算の領域に転じて、実験との連関を数式の無自覚的適用に追いやる危険がなしとしない。そのうえ、抽象的な量を測定するということは、不合理でなくてはならない。直観的・粗視的意味で位置というものをもたない電子の位置測定ということはかような考えからすれば背理であるほかはない。シュレーディンガーが指摘するごとく、往古、ギリシャ神話の盗賊プロクルステスは、彼の手に落ちた旅人の身体を引き伸ばしたり切り縮めたりして、彼自身の鉄の床に寸法を合わせたというが、「原子的過程へ粗視的・古典的概念を適用するのは、プロクルステスではないか」、かようにシュレーディンガーは直観的・幾何学的概念の廃棄を主張する。[4] 彼をして言わしむれば、「たとえば時間 $t=0$ における水素原子中の電子の位置のごときは一般的法則を追究する学としての物理学にとってなんらの価値も興味もなく、それをあえて測定せんとする物理学者はない。直観的・幾何学的概念を廃しても、何の損失もないのである」と。実際問題として彼の言うごとく原子的対象の位置をそのものとして追究することはほとんどない。けだし単にそのものとしての位置は対象にとってまったく偶然的なものだからである。しかしながら、彼がかつて直観的内容の重要性を例示した衝突問題のごときはもちろん、すべての実験は多少とも間接的には実験操作の条件として原子的対象の位置（もちろん相対的な）に関心をもたぬ場合はないくらいである。P・ヨルダンはすでに、

この以前からしばしば、「原子物理的出来事における『観測』とは、けっして現前にあるがままなる客観的事実が、単に主観に知られる（bekanntwerden ないし zukenntnisnehmen）という意味ではなく、かえって対象を強制して観測さるべき事実を一部分創り出す schaffen ことである」と述べていた〔Born-Jordan, *Elementare Quantenmechanik*, S. 324—5, Jordan, *Naturwiss.* 20, 45, S. 815 (1932)、科学3（一九三二）、一—二号、*A. Q.T.* S. 308〕。また、ボーア〔ら〕も場の測定を論じた際、「現象と測定過程との不可分離性」に関して、一定の定常状態にある水素原子内電子の位置または運動量測定を挙げ、「測定結果は測定によって初めて創られる」というのはある意味で正当だと認めている。しかもこれは、測定結果の古典力学に基づく説明可能性の制限を意味するのではなく、単に測定過程による原子状態のあらゆるコントロールが不可能なことを意味する。[5] これが上述のシュレーディンガーの非難の的となったのであろうが、この場合においてヨルダンの大胆な言い方は正しいと見なければならぬ。A・エディントンも「物理学者はア・サイエンティフィク・プロクルステスに擬することができる」ということを認めるが、これは彼の一家言としても、「経験が主観‐客観関係であるとすれば、主観は彼の半分の持ち前をとる権利がある——いな棄てることはできないから、プロクルステス〔流に宇宙を取り扱うの〕もけっして不当な我儘とは思われない」[6] と言っている。観測・測定の概念は量子力学にいたって初めて、近世初期のF・ベーコンの自然探究の格言「自然の秘密はつねのままであるときよりも、技術によって苦しめられたときにいっそう容易にその姿をあらわす」(98) の態度に徹底したのである。しかしてこれは、イマヌエル・カントが純粋理性批判第二版の有名な序文（BⅩⅢ, ⅩⅣ）（一七八七）でガリレイ、トリチェリの実験の計画

性を指摘して、自然から単に教えられる生徒でなしに、答弁を証人に強ゆる裁判官として向かうことを、言いかえれば理性が自ら自然のうちへ挿入した原理に則って自然において求めなければならぬことを、物理学における思考法の革命 Revolution der Denkart と呼んだときにも、彼の観念論的な立場の制限内においてではあったが——彼の範疇は日常的な道具的な自然のそれであった点に注意せよ——疑いもなく感づいていたのである。従来の古典物理学がなおスコラ的な概念を完全に廃棄しえず、測定を単に客観と観照の形式でとらえていたのに対し、いま、praxis poiesis〔実践的創造〕としてそれ自身対象化された人間的活動として実践において思惟の現実性、此岸性を証明する立場が生まれたのである。

すなわち、量子力学における測定は、一定の対象（一定のハミルトン函数で表現された系）と測定装置とを交渉せしめた際にいかなる物理的な反応を得るかということである。experimental stimuli〔実験的刺戟〕に対する biological response〔生体的反応〕を見ること以外にはない。しかして測定装置なるものはもともと古典的概念で律せられるものであるから、測定はあたかも古典的量を測るがごとき arrangement〔装置〕と manipulation〔操作〕をもっておこなわれるほかはない。対象がそれ自身として直観的モデルのごとくあるということを前提するのではなくして、測定された結果が古典的量を測った結果と同等の意味において、粗視的な経験的に把みうる結果を与えるのであり、この一定の測定の仕方に対して一定の客観的な意義をもつ結果を与えることによって、まさしく量子物理的量は定義されうるのである。これは従来の古典物理的測定でも無自覚にはおこなわれていたが、これを明瞭にするだけの必要がなかったのである。かように原子的過程に対して

は、従来の古典物理学では自覚されなかった inference〔推論〕としての測定の意義が明らかとなるとともに、作用量子の存在のために測定の際の擾乱の補正・制御は原理的に限界づけられ、古典的物理学には見られないまったく新しい面貌を呈することになる。

それは一般的にいえば、古典運動学では機械的表象のもとに隠蔽されていた「運動」の概念の矛盾が暴露されたとき言えるのである。かのエレアのゼノンは、物体は、その空間運動 locomotion において、つねづね、各瞬間ごとに空間の一点にあるのを論拠として「飛箭に運動なし」と断定したし、荘子天下篇第三十三に恵施派（—BC三一九）の弁として見られる「鏃矢之疾而有不行不止之時」も断片的で、その解釈に異説紛々たるを免れないが、胡適がしたように、司馬遷の註におけるがごとく「形分れば止り、勢分れば行く……」の意味にとれば、まさしく空間運動の相互排他的な二つのモメントを指摘したものと考えうるであろう。アリストテレスは、「ゼノンのアンチノミーは時が瞬間をもって構成されているという仮定から出た謬論であり、瞬間によって〔は〕運動も静止も決定されない。有限な時間経過によって初めていずれかが決定される」という意味深い指摘をして、自身は時を連続と見るのである。ロスはこの個所を解説して、ラッセル流の集合論的な解決はそれ自身まだ不明瞭であると指摘しながらも、ゼノンの矛盾は、空間、時間および運動に特殊なものではなく、数系列自身の本質に含まれたものであることが明らかにされ[3]たのはたしかにカントール、デーデキントらの功績であると認めている（W. D. Ross, Aristoteles' *Metaphysics*, I p. 71—85）。時間が数学化[4]された形態では、むしろブラウアーの連続（それはある意味で基体としての連続空間の客観性を認めるものである）のほうが量子力学的な事態に即応しているように思われる。

この点、生の哲学の代表者アンリ・ベルグソンが、「われわれの知識の活動写真的な、すなわち不連続なフィルムの一駒一駒から運動を構成するような性格に対して、これに反して時間をインスタントから成るとせず、運動自体を純粋な indécomposable な〔分解できない〕持続」としたのは、多分に集合論的な、したがって時間が空間的連続に化していて、運動の真の矛盾が隠蔽されている。バートランド・ラッセルの解決法とは異なるものの、いずれも運動を一つの全体と見る点で点的・固定的である。

これらを量子力学のもたらした認識の照明のもとにふたたび検討するとき、二〇〇〇年来論駁せられながら、論駁され終わらなかった、運動の実在性のアポリアはこの空間的位置と運動との相互排他性に関するかぎり、ヘーゲルがこれを解したごとく、単なる概念の Dialektik〔弁証法〕でなく (Glockner, *Bd.* 17, S. 339) ゼノンの主張は単なる詭弁ではなくて、かえって鋭い直感に支持された真理の核を有するのではないかと思わしめるのである。

ボーアはすでにコモの講演で、固体（としての物尺）および不可擾乱的な時計にある方法で固定

古典理論	量子論	
空間時間的記述	entweder 空間時間的記述	oder 空間時間的でない数学的図式 Schema
因果性	不決定性関係	因果性
	統計的連関	

された座標系についての記述に触れている。[7] しかしこの当時には古典理論との自然記述の対照を強調する点に重点がおかれており、古典理論では空間時間的記述法と因果的記述法とが同時にユニオンとして融合〔していること〕が特徴（*AT. NB.* S. 34）であったが（いわゆるメハニスムス）、原子的領域では両者はもちろんそれぞれの内的妥当性 intrinsic validity は失わないで、相補足しながらも、しかもある程度まで相互に排斥する点が強調せられたのである。

ハイゼンベルクの名著に掲げられた図式もこの記述法の対照に主眼がおかれている（Heisenberg, *P. QT.* S. 49）。

ボーアが因果的記述法というとき、エネルギー、運動量の dynamical conservation law〔力学的保存則〕を念頭にしていたようであるが、この図式における左下端の因果性はパラメーターとしての時間 t を含む数学的関係の意味（いわゆる mathematical causality）〔数学的因果性〕であるが、ボーアは両記述法を「通常の因果性の二つの補足的な見方 two complementary aspects of ordinary causality」（Faraday Lecture (1930), p. 376）[7] とも考えている。この点、補足関係を「古典的因果性の自然にかなった一般化である」と見なすW・パウリの意見もボーアに忠実なものである。[8]

しかるにこの補足性は究極において具体的な測定装置の相互排他的構造に帰することが明らかとなった。パウリにならって言えば、粒子の位置の測定と運動量測定とは相互に排斥する実験装置を利用せねばならぬ。前者に対してはつねに空間的に固定された器械部分（物尺、時計、細隙）が存在し、それの上へ運動量の不確定な量が移される。後者では粒子を正確に時間的に追跡することが不可能になる。[9] すなわち、記述法の相互排他的性格はすでに固定的な装置か、可動的な装置かとい

う実験の企画にあらわれている。古典理論では両装置を結合すること、すなわち相次いで、ないし同時に適用することによって、両記述法をともに満足せしめえたのであるが、量子論では、測定装置が対象に与える擾乱を制限しきれないので、測定者は二者のいずれかを選択し(または両者の部分的犠牲において)、態度を決することを余儀なくされる。その意味で拡張でもある。しかるにこの測定における選択の必然性は両者のいずれを選択するかの自由任意性を他面に有するのである。

この自由なる選択の決定を繞って、いずれか一方の測定装置が適用せられて初めて対象の物理的量のいずれが問われるかの意味が生じるのである。一九三五年アインシュタインがB・ポドルスキおよびN・ローゼンとともに投じた「物理的実在の量子力学的記述は完全と考えうるか?」という一種のポレミークは、この事態の理解に対して旧来の客観的実在の観念がいかに根強く障害となっているかを表わしたものといえる。われわれは、この論難は、アインシュタインのごとき不世出の天才にしてなおかつ固定した数学的観念に禍される時期に遭わねばならなかったという悲劇的な事実以外には歴史的な意義をもつとは考えないので、物理的実在に対する量子力学の見地と相互補足性の概念の例証に役立つかぎり簡単に述べることにし、その数学的技巧を省略したい。アインシュタインらの意見の要旨は次のごときものである。

「およそ物理学の理論は、あらゆる理論から独立な客観的実在と、理論がよってもって構成される物理的概念の区別をせねばならぬ。これらの概念は客観的実在に対応せんとし、これらの概念によってわれわれはこの実在をわれわれ自身に描く。さて理論が完全なるためには、物理的実在のすべての要素がア・プリオリな哲学的考察で決定されないで、実験の結果によって決められる。さしあ

たってある体系をなんら擾乱することなく、ある物理的量の値を確実に予言しうるならば、この物理的量に対応する物理的実在の一つの要素があるという判別法で満足しておく。これは実在の十分条件とも見られ、古典理論にも量子力学にも適用できる。

ところで量子力学では、波動函数はそれの対応する状態における系の物理的実在の完全な記述を contain〔包含〕すると普通は仮定されているが、以下に然らざる所以(ゆえん)を証明しよう。

いま二つの系(I)と(II)とを一定時間交互作用 entangle させる。この交互作用以前の各系の状態は知れているものとする。量子力学にしたがえば、交互作用の終わってのちの(I+II)全体としての波動函数をΨとし、(I)についてのある物理的量Aの固有値をa_1、a_2……とし、相当する固有函数を $u_1(x_1)$、$u_2(x_2)$……とすると

$$\Psi(x_1, x_2)=\sum_{n=1}^{\infty}\psi_n(x_2)u_n(x_1)$$

となる。xは変数で、x_1は系(I)のそれを、x_2は系(II)のそれを表わす。いまAを測定して測定値a_kを得れば、(I)の固有函数は$u_k(x_1)$で(II)の状態は$\psi_k(x_2)$となることがわかる。もし物理的量AでなくてBを測れば同様に

$$\Psi(x_1, x_2)=\sum\varphi_s(x_2)v_s(x_1)$$

となる(ただし$v_s(x_1)$はBの固有値b_sに対する固有函数)。(I)が$v_r(x_1)$なら(II)は$\varphi_r(x_2)$である。ところが交互作用は測定のまえからなくなっているので、(I)における測定は(II)を変えないはずである。かくて同一の実在、すなわち交互作用を終わった後の系(II)に二つの異なる

波動函数（ψ_kとφ_r）を対応させることができる。いま、ψ_kとφ_rとがそれぞれ二つの可換でない演算子P、Qの固有函数に対応する場合も例証できる（例、略）。かくて波動函数は完全な記述を与えるという前提から出発し、（II）になんらの擾乱を加えずその可換でない演算子を有する二つの量の値、p_kあるいはq_kのいずれでも確実に予定〔言〕しうる。そこで物理的実在の判別法にあつらえ向きに、この二つの物理的量はいずれも同時的な実在性を有するという結論に達する。これは明らかに現在の量子力学の理論と矛盾する。したがって波動函数による量子力学的記述なるものは不完全であると言わなければならない。

もちろん、人が二つ以上の物理的量はそれが同時に測定または予言されなければ実在の同時的要素とは見なされないと主張すれば、上記の結論は得られないが、かかる主張によるときは、PおよびQの実在性が系IIになんら影響を及ぼさぬ系（I）での測定の過程に依存することになり、これは実在性の定義に対して不合理である。

かくて波動函数が不完全なことは証明されたが、物理的実在を完全に記述する理論が存するかいなかは答えないけれど、かかる理論の可能性は信じるものである（*Phys. Rev.* 47, p. 777（1935））」。

以上のごときアインシュタインらの量子力学に対するポレミークは、量子力学の真の方法に味到したものにとってはほとんどなんらの痛痒をも感ぜしめないのであるが、旧来の物理学と暗々裡に結びついていた物理的実在の観念を脱却しえない多くの学者は、このパラドックスによって困惑の渦中に投ぜられたようである。それはその後数ヵ月間に *Physical Review* の寄書欄に散見され

た。「どちらが正しいとも言えない（Ruark）〔同誌、48, p. 466〕」とか、「第（Ⅱ）系についての測定もなんらか一種の**Austausch**〔交換〕効果のごときものによって、（Ⅰ）系に影響を及ぼすかも知れない（Kemble）〔の著書〕」というような種々の迷論によっても明らかである。また平素ボーア－ハイゼンベルク流の解釈とは別個に独自の見解を持しているシュレーディンガーは、アインシュタインらの論文に少なからぬ意義を認め、これから数学的理論を展開し、量子力学の不備を突こうと試みた。

ボーアは同じ年、アインシュタインらの発表後数ヵ月、*Physical Review*〔48, p. 696 (1935)〕に同じ標題の論文を寄せ、アインシュタインらが、パラドックスを生ずるとした場合そのものを思考実験によって分析し、これは量子力学の変換理論から当然帰結されることを、簡明な数式によって示した。すなわち彼によれば「量子力学は物理的実在の或る要素を勝手にピックアップして他の要素を犠牲にするごとき不完全な叙述ではなく、空間的 location〔位置〕に適するものか、それとも〔運動量の〕保存則を legitimate〔正当〕に適用できるようなものかという、根本的に異なる実験の装置および結果を合理的に区別する点に特徴がある」。Pを知ることもQを知ることも随意であるというように「任意性が残るように見えるのは、われわれがいずれの測定器械を操作するかのその選択の自由を示すもので、これは実験がわれわれによって任意に計画されることを一応は承認する以上、なんら異とするに足らない」。

通常の古典的な統計力学では或る種[5]の物理的量の値が知られていないというだけであったが、量子力学ではたがいに不可換な、すなわち相補的な量の一方を測定する装置を採用する場合には、

〔対象と装置との相互作用を正確に統御することができないのであるから、量の正確な定義の不可能性を問題にしなければならない。」アインシュタインらは二つの系の一方たる（I）を測定することによって、系（II）は全然擾乱を受けないとして、これから矛盾を導き出しているが、もちろん系（II）はなんらの力学的な擾乱をも受けない。しかしながら系（I）の測定は系（II）のいかなる種類の量の値を予言するかその可能な予言[6]の種類をきめる。まさにその条件に決定的な影響を及ぼさずにはおかない。ボーアはこれを例解するのに、アインシュタインらが数学的形であげたまさにそのパラドキシカルな例に相当するような一つの思考実験をもってした。

　この思考実験はまさに敵の刃を奪って逆にその喉首に擬した形で、きわめて適切なものであり、巧妙に見えるが、ボーア自身も言うごとく実質的にはすでに周知の簡単な事実にすぎない。すなわちハイゼンベルクのγ線顕微鏡において散乱されたγ量子を、通常そうであるように固定した顕微鏡で観測すれば、電子の運動量の値をある程度以上精密に予言することはまったく無意味に帰するし、もしまた運動量保存則を適用して電子の運動量を予言しようとすれば、反射されたγ量子の運動量を測るために顕微鏡を可動的にせねばならぬが、これによって電子の位置の予言は当然傷つけられることを述べたが、上述の場合とはほとんど同じことである。

　われわれはこのアインシュタイン－ボーアの論争を通じて量子力学における相互排他的補足性の意義をさらに明瞭にすることができる。アインシュタインらの疑問からもわかるように、不確定性原理ないし相補性は、たとえば位置－運動量の両者を同時に精密に知ることが原理的に不可能であると言うだけではまだ十分ではない。上述のパラドックスはこれには手を触れていない。問題は、

かような物理的量に相当する実在の要素がアン・ジヒに存在すると考えたところから生じた。

(1) N. Bohr, *AT. NB.* S. 34—35, Heisenberg, *Wandl.* S.10—

(2) Heisenberg, *Wandl.* S. 11

(3) Heisenberg, *Wandl.* S. 12

(4) Schrödinger, *Naturwiss.* 22, S.513 (1934)、および 23. S.809 (1935)。

(5) Bohr u. Rosenfeld, S.48 〔*D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk, Math-fys. Med.* XII, 8, 1—65, *Zur* Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrössen〕

(6) A. Eddington, *Relativity theory of Protons, Electrons*, p. 329 (1936)

(7) N. Bohr, *AT. NB.* S. 93, Faraday Lecture (1930), *Joun. Chem. Soc.*, p.349 (1932), p. 375—6

(8) vgl. N. Bohr, *Ann. d. Phys.* 5, Folge, Bd. 32, S. 7 (1938)

(9) Pauli, *Hand. d. Phys.* S. 89 (1933), Bohr, *Faraday Soc.* p.375 (1932)

〔1〕選集版では、「……原子的對象的な……」。

〔2〕選集版では、「……によつて測定される……」。

〔3〕選集版では、「……に含まれたものであることが明らかになつた……」。

〔4〕選集版では、「……時間が數字化……」。

〔5〕選集版では、「……幾種の……」。

〔6〕選集版では、「……豫定……」。以下同じ。

§20 相互排他的補足性[1]――（統計力学と熱力学の関係）

ハイゼンベルクらの量子力学の建設時代とほぼ時を同じうしてボース－アインシュタイン〔の統計〕、ならびにフェルミ〔－ディラック〕の統計が得られたこと、またそれと不確定性関係との関係についてはすでにわずかながら触れたところである。その後間もなく統計と量子力学の形式とはハイゼンベルクやディラックの手で結びつけられ、[1] ボース－アインシュタインの統計は対称的テルム系、フェルミ－ディラックのは反対称テルム系に帰せしめられた。しかして、そのより深い基礎づけはのちの波動場の量子化によって得られるのであるが、われわれがいまここで取り上げるのは、これとは方向を異にするパウリやノイマンによってすすめられた熱力学的な統計学の一つの問題である。

古典力学の運動方程式[2]が時間変化に対して完全に可逆的でありすべての分子の要素過程としての運動がこの方程式にしたがうと考えなければならないのに、熱力学の第二主則に表現されるような不可逆的過程が自然界に存するということは、すでに古くから学者の注目をひき、ルートヴィヒ・ボルツマンのH－テオーレム[2]〔H定理〕のごときは、まさにこれを確率論の導入によって解決せん

としたものである。しかし彼がその証明に用いたクラウジウスの Stoßzahlansatz〔衝突数に関する補助仮説〕やこれに相当するギブズ統計学のエルゴーデン仮説（ないしその修正たる Quasiergodensatz〔準エルゴード仮説〕）は、当時として説明ができない仮説であったし、そのうえツェルメロ（一八九六）の Wiederkehrheit〔再帰性〕（これについてはあとにポアンカレ、カラテオドリにより同種の議論があったが）、ロシュミットの Umkehr〔回帰性〕（一八七六）のごときパラドックスが提出され、これらのパラドックスがボルツマンの戦闘的精神によって戦われ、PおよびT・エーレンフェスト夫妻によってともかく解明され終わったとは言え[3]、依然としてそれが上記の仮説に立つことは確認されなければならなかった。

量子力学はその本質が統計的性格を有するため、一見すると以上の矛盾の解決には好都合かとも思われるが、問題はそのように単純には片づかない。シュレーディンガー方程式は時間の方向に対してまったく対称的でその可逆性に問題はない[4]。シュレーディンガーもこの問題を取り上げたのであるが、不可逆性を導くがためには確率分布に関する仮説を追加しなければならないことを思うと、エルゴード仮説のごとき厄介な仮説を導入する勇気も出ないので、この問題を放棄せざるをえなかったのである。

ヴォルフガンク・パウリは、ゾムマーフェルト六十歳の祝賀論文[3]においてこの問題の一つの解決、すなわち物質系の種類に関する特殊な仮定なく一般的な系に対する一定理を量子力学の立場から証明しようと試みた。

彼は「統計的集団の平衡状態は、要素間に交互作用が働き、各々の諸状態間に生じる転移過程の

結果である」という見地から、ディラックの摂動計算法にしたがって、マトリックスのエルミート的性格を用い、相互に逆向きの転移の相対頻度が等しいことを証明したが、これは古典統計力学のリウーヴィルの定理のアナローグをなすもので、これからすべて（entarten〔縮退〕していない）定常状態のア・プリオリ確率の等しいことが波動力学的根拠を得た[5]。これから容易にH定理が証明される。しかし注意すべきは、転移頻度の計算に際して後〔に〕は一つの Elementarbereich〔要素領域〕に属する固有振動の位相は相互にまったく独立で無規則であるという仮定をしなければならなかったが、これは古典力学の Stoßzahlansatz〔衝突数に関する補助仮説〕にアナローグな要素的無秩序性の仮定 Hypothese der elementaren Unordnung にほかならないのでH－定理の証明にはこの場合にも古典力学同様の仮説がつきまとうのである。しからばこの無秩序性の仮定に[4]さらになんらかの根拠を与えることができるであろうか、パウリは何かある現象の時間的経過を把握するにはなんらかの測定器械で測定しながら系を追跡せねばならぬ messend verfolgen (S. 39 f) といい、かかる継続的観測が無秩序性にしたがってまたエントロピー増加等に関与するかに説く。一方ではまた、エーレンフェストの言うところの古典統計力学の位相空間中の「fein な〔こまかく見た〕密度」から「grob な〔あらく見た〕密度」への移行に相当して唯一の状態についての系の分布から、多くの状態を含む Elementarbereich〔要素領域〕の移行をおこない、これのなかで Unordnung〔無秩序〕が得られるかを説く。その点が十分明瞭でない。

J・v・ノイマンは当初量子力学の立場から統計論的熱力学の基礎づけに努力したが、一九二九年「Beweis des Ergodensatzes und H-Theorems in der Mechanik」[5]なる論文を発表した。

統計力学半世紀のアポリアであったエルゴード仮説を証明するというのであるから、学界の注目をひいたが、このすぐれた数学者の論文はすこぶる難解であり、のちの著書における関連事項の説明にもかかわらずよほどのち（一九三七年）にW・パウリおよびM・フィエルツの要約的解説[6]が発表されたくらいである。それらにより筆者の理解するところを述べよう。

ノイマンは、量子力学的な測定が一般に不可逆的であり、古典力学とアナローグに量子論的に定義されるエントロピーの増大を結果することを証明したが、この微視的とも称すべきエントロピーは、観測せずに放置された系では増大しないので、なお古典的な、いわば粗視的なエントロピーとはかなり性質を異にするものである。そこで時間とともに増大してゆく粗視的エントロピーなるものは量子力学の立場からはいかに考えたらよいか。ノイマンによれば、われわれが無秩序性の仮定を避けるためボルツマン流の統計力学でなくギブズにならって量子論的統計力学を建設しようとするとき、まず出会わねばならない困難は、座標（q_k）と運動量（p_k）との連続体からなる位相空間の概念である。この場合量子力学のΨ函数で記述される純粋状態が、ある意味で古典理論の統計集団に相当するので、もし系のただ一つのはっきり決まった状態のみを考えても一定時間点に系がある位相空間の細胞にある確率しか出ないのであるが、これはエントロピーの変化とは関係なく時間的傾向の対称な微分方程式で記述される。周知のごとく不確定性関係はq_k、p_kの〔同〕時間的確定を許さないし、さらに系の一状態に対して二つの領域 Interval I、Jを与え、q_kが確実にI中にp_kが確実にJ中に存在することはI、Jの積が$\frac{h}{4\pi}$よりはるかに大きくともこれは不可能であるからだ。それにもかかわらず、粗視的測定で座標（Q_k）と運動量（P_k）とが同時に測定されること

は疑うことができない。そこでこの粗視的な座標や運動量は量子論の量q_kやp_kとは別のもので、たとえば二つの指針の位置とか、写真乾板の二つの黒点とかのごとく同時に任意に正確に測れる量である。そこでこのP_k、Q_kとp_k、q_kとはもちろんそれぞれ関連はあるが、つまり近似値であるが、その関連が多少ルーズでその近似の程度を制限するのがまさに不確定関係だと考えうるであろう。それで粗視的量は微視的な量のなんらかの意味での平均のごときものである。この平均の意味についてはのちに触れよう。

周知のごとく、古典的な意味でのエントロピーの時間的変化は、観測者が原理的には測定しうべきものを全部は知らないところから生じた。このアナローゴンとして量子力学においても粗視的量がつくられたのである。この粗視的量は、かの古典論において前述のエーレンフェスト夫妻の導入した grobe Dichte な〔あらく見た密度〕のみ測れる観測者に類似している Makrobeobachter〔マクロ観測者〕に対しては、もはや分解できないもの、それ以上に分析できない性質に対応し、この性質が「世界の粗視的記述の構成要素 die elementaren Bausteine der makroskopischen Beschreibung der Welt」となり、古典的な位相空間の細胞区分 Zelleneinteilung に相当し、これをもって記述された統計集団のエントロピー（いわゆるマクロ・エントロピー）はもはや時間的に不変でない。そこでこのエントロピーの変化はほとんどつねに増大の方向であること（いわゆるH定理）が証明されなければならない。古典統計力学ではこの証明のために分子的無秩序性、もしくは当時はまったく証明のできなかったエルゴード仮説を要したのであるが、ノイマンは、量子力学ではかかる仮定なしにないしエルゴード定理そのものとともに、証明されると言うのである。彼の証明した命題は

内容的には結局つぎの命題に帰着する。『粗視的な統計集団のエントロピーの時間平均は、平衡状態の mikrokanonisch 〔ミクロカノニカル〕なエントロピーとほとんど等しい』

かかる Makrobeobachter を熱力学的観測者と呼んでよかろう。かかる観測者に対してはこれによってエントロピーは圧倒的な時間に〔わたって〕平衡状態のそれときわめて近く、大きな偏り[7]はまれにしかない。したがって、まれにそのような大きな偏りがあった場合にも[8]あとの時間にはほとんどいつも平衡状態へ近づくのである。これはまさしくH定理の内容である。

マクロ観測者のうちには例外として熱力学的でない観測者もあるにはあるが、そのような観測者のある確率はきわめて小さいことが計算で確かめられている。かくてノイマンは、「シュレーディンガーが途中に放棄したエルゴード仮説を量子力学に関しては証明し得た」とする。

注目すべきはノイマン（ならびにパウリ－フィエルツ）が[9]、この証明において遷移確率と関連した量の観測者についての平均を施している〔ことである〕。しかし多くの観測者による確率にはなんら区別すべき根拠がないのに、伏見康治氏[10]も注意していられるように、ここでア・プリオリ平等確率が仮定されているのである。

これはけっして軽々しく見のがしえない事実である。観測者に関する平均とは、散乱分布せる多くの観測値の平均であるが、これは結局観測装置を構成する粗視的な部分の擾乱によるものではあるまいか。これが量子論の不確定原理の内容と同じだと言うのは、おそらく言い過ぎであろうが、ともかく粗視的観測の際に見透しがたい平均化がおこなわれるのであろう。古典統計力学のごとく対象の側から見れば、これは分子的無秩序性であり、たとえば Stoßzahlansatz の想定している

ような物理的過程と類似のものであろう。かく考えてくると事態は古典統計力学からどれほど改良されているか疑問になってくる。なるほど量子力学は、対象と観測器械との交互作用という概念によって、対象的方向に確率的考察の根拠を尋ねあぐんでいた古典的統計力学から一歩をすすめたのではあるが、ノイマンの証明が古典的なエルゴード仮設や無秩序性のあらゆるアナローゴンから純化されているとはとうてい言いえないと信じる。いな、すでに古典的な問題の取扱いにおいても慧眼なる学者は、観測手段の粗視的な性格がエントロピー増大と関係あることに気づいていたようである。これについて想起されるのは、優れた才をいだきながらいまだ壮年にして逝った、かのM・v・スモルコフスキが（一九一三年）ヴォルフスケールシュティフトゥングの委員会主催でゲッティンゲンでおこなわれた物質および電気の運動学的理論に関する講演会でおこなった、古典的ではあるが、天才的な彼の思想を反映したきわめて美しい講演「熱力学第二主則の妥当性の限界 Über die Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie」である。[6] スモルコフスキは周知のごとくアインシュタインと並んでブラウン運動の理論の創始者であり、けっしてE・マッハの流れを汲むものではない。しかし彼は第二主則のサイクルその他の手段による種々の表わし方がいずれも十分満足ならざることを論証したのち、プランクが antropomorphisch〔人間主義的〕なりとして斥けた「第二種の perpetuum mobile〔永久機関〕は不可能である」という命題にかえって深い意義を見出そうとする。「人間に対する効用性」の見地から表現された「技術規則 Ingenieurregel」、このうちにじつはアポリアの解決の鍵がある。「通常の古典物理学におけるごとく、実験する人間が一種の『Deus ex machina〔劇のストーリーを急転解決する登場人物〕』と考えられ、自然の瞬間的状態

を継続的に正確に知り、任意の瞬間に、仕事〔をすること〕なく（自動装置で）粗視的現象を惹起せしめたり中断したりできれば、個々の分子を把みうるマクスウェルの魔にあらずとも、精神的存在者ならば第二主則を擾すことができる。」エントロピー則の成立は一に分子的 Schwankung〔ゆらぎ〕を利用しえざる粗大な器械のみしか取り扱えぬ人間の性格に由来するのである。器械を絶対的な剛体と見ることができず、それが分子をもって構成されている以上継続的 Perpetuum mobile II. Art〔第二種の永久機関〕の不可能は技術の不完全にあらずして、生物の技術が多数の分子からなる器械を使用せねばならぬという原理的な不可能根拠による。

　だがわれわれはここでふたたび一つのパラドックスに逢着するのではなかろうか。観測がエントロピー増大に不可欠の前提ならば、観測されずに放置された系のエントロピーは、はたして時間的には変化するであろうか？　それとも通常放置されたと考えられている系も、じつはしからざるのか。おそらくここで孤立した系なる意味をもっと正確にし、粗視的に孤立した系も微視的には孤立でない所以を尋ねるべきであろうか？　私見を述べることが許されるならば、観測による撹乱も結局系に摂動を与える点がエントロピー増大に本質的なのではなくて、この観測が必然的に系に関する不完全な知識を持ち込む点にある。不確定原理は系の状態の完全知識と矛盾しないので、これとは別種なのであるから、粗視的量の名のもとにこの状態の知識の不完全性が持ち込まれようと、いずれでもじつは同じことである。ただ粗視的観測によって持ち込む場合はその粗視量の unzehlichkeit[11] によって、Stoßzahlansatz のごときものがより自然な形で持ち込まれるだけだ。

　さらに一転して、伏見康治氏の提出された問題、「古典統計力学に時間集団 Zeitgesamtheit が問

題になるのは、長期観測における系の平均的行動に意味があると考えられるからである。古典的観測者は系を擾さずに系の変化を追跡できる。量子力学では微視観測者にこの性格がないことは周知のとおりであるが、それではいかにして粗視観測者の場合にはこの性格が回復されるのであるか？ノイマンの証明における時間平均は、同一系の長期の連続的観測の平均という意味ではなくて、観測を被った系は除外されて、異なった時刻の観測は新しいまだ観測によって侵されていない系についておこなわれるのである。そこで連続観測を考えようとする場合には、観測をおこなった後の系の状態を知ることが必要ではあるまいか。[7]」そうなればこれは量子力学未解決の難問である？それともv・ノイマンが統計集団を導入する際、その効能として述べたように、十分多くの要素を含みながら、しかも全体に対してはきわめてわずかな部分系について測定することによって、測定による影響をいかほどでも小にするという思考がそのまま許されるであろうか。[8]

これらの問題に対する解決の試みをここに述べることはしばし差控えよう。しかし、N・ボーアが相互排他的補足性の例としてH定理に関連して述べたところに耳を傾けたい。[12]

以上説ききたったごとく、量子力学における統計的性格は古典統計力学のそれには本質的に異なるものであるにもかかわらず、また他面にまったく異なる意味においてボーアがファラデイ講演（一九三〇年）の一節〔P. 376〕で述べたように、われわれは古典理論のなかに一種の相互排他的補足関係を見ることができる。

その「典型的な一例は」つぎのごとくである。「熱の統計的理論によれば、温度の概念そのものは、問題になっている諸物体中の原子の有様 behaviour の詳細な記述と排他的関係に立っている。

まさにこの点こそは、マクスウェルの速度分布およびとくにいちじるしくギブズの統計熱力学の取扱いのうちに含蓄され、ボルツマンの確率によるエントロピー解釈が含むエントロピー増大の法則と個別的力学的過程の一般的可逆性との外見上の矛盾撞着を解決することをえしめるものである。事実、温度の平衡化に表現された熱力学的不可逆性は、事象の経過の逆変が不可能なことを意味するのではなく、かえってかかる逆変の予言は各種物体の温度の知識を含むいかなる記述の一部でもありえないことを意味するのである。この事態は量子力学の記述に特徴的な不可逆的性格といちじるしいアナロギーを示している。まこと〔に〕古典的運動法則の可逆性は量子論的シンボル symbolism の決定にも保存されているが、一定瞬間における系の状態を古典概念を用いて定（義）せんとする際の不確定性は、このシンボルの物理的解釈の際の本質的な不可逆性を含んでいる。熱力学においても量子力学においても、その記述はわれわれが事象を制御 control するうえに加えられた本質的な制限を含み、これは通常の力学的意味ではっきり定まった現象を云々することの不可能なことと結びついている。もちろんこの制限は両者の場合まったく原因を異にしている。実際、統計的熱力学の場合には、[14]事象の詳細を説明するのに力学的概念が無効であるというようなことは in the first place〔に〕問題にしているのではなく、かかる詳細な説明が温度の定義と相容れない点が問題なのである。これに対して量子力学では、原子的安定性の基本法則と、すべての測定がよってもって解釈さるべき古典力学的概念の使用とが根本的に相容れない点こそ問題なのである。まことにすでに知ったごとく原子的現象の記述における『相補性』の見地は作用量子の存在によって余儀なくせられたものであり、古典物理学においての〔相対性の〕見地がすべての電磁的交互作用

の有限伝播速度から生まれたのと相似たものである」。

古典的統計的熱力学に対するかような方法論的洞察が、新たな量子統計力学へも示唆するところがあろうとは考えられるが、それはいかなる形であらわれるであろうか。これについて一言するまえにわれわれはまず量子統計力学について一言触れなければならない。v・ノイマンの量子統計が一歩一歩、古典概念に対応したアナロジーで建設されているのに対し、W・M・エルザッサーはきわめて注目に値する一つの疑義を提出した。[15] 彼のアイディアは、自ら語るところによればボーアが*Light and life*〔光と生命〕で述べた（たとえば生物の機能とこれを構成する無機物質の特性のごとき）一般化された相互補足性から示唆されたものである。ボーアの上記のファラデイ講演を引照せず、かえって生物学的アナロジーから逆に統計力学を顧みた点が、いかにかかる他領域への展望が有意義であるかを示すものとして興味あることである。

エルザッサーは、ノイマンが単に個々のシステムに対するわれわれの知識が不確定原理で制限されている点のみに注目したのに対し、量子統計熱力学の対象を多少とも相互に物理的に纏った集団と見なければならないから、むしろかかる個々のサンプルが測定後、はたしてふたたび集団を構成するであろうかという点を検討する。

v・ノイマンは系を純粋状態で代表しているが、もしもわれわれが実際に純粋状態を得るような測定を遂行するならば、その測定が非常に時間を要して、時間的展開の考察を目指す統計力学にとって無意味であるようなものでなく、したがって多かれ少なかれ来る擾乱を与える場合はもし純粋状態を得んとしてあまりにも精密な測定を繰り返すならば、測定装置と系との交互作用は系の各部

分のあいだの交互作用を凌駕し、測定後短時間にして系は多数の部分に burst〔分裂〕し去り、問題の集団〔の〕物理的特性は失われ、その場合強いて個々の状態の重畳をおこなってアンサンブルをつくっても、それは「なんら物理的意義なき単なる数学的フィクション」であろう（p. 989）。

すなわち「自然に見られる多数の系の集団の平均的 behaviours〔有様、ふるまい〕を記述したり就中(なかんずく)予言したりするためにアンサンブルを用いることと、個々のサンプルの状態の精密な知識とは、相互に排他的である。」これはボーアの相互排他的補足性の一例とも言うべく、古典力学の場合と異なり、測定機構の技巧化[16]によっては避けがたいディレンマである。

そこでv・ノイマンのごとき pure state〔純粋状態〕の理論だけでは複合系の量子論的表現は解決されないから、かかる問題では個々の系といえども統計的マトリックスで代表さすべきである。このようにエルザッサーは推論する。ただこの統計的マトリックスの構成に対しては、きわめて注目すべき重大な困難がある。[9] エルザッサー自身はこれを次のように切り抜けようとする。まず与えられた総集団が物理的意味を失わぬかぎりは、これをそれぞれの別の統計的マトリックスで代表される各部分へ分けて考え、かく分かつことが問題の主旨を覆さぬような系を separable〔分割可能〕な集団と名づけ、この分け方がそれ以上すすめば物理的に無意味になるところまで分けられた集団を non-separable〔分割不可能〕な集団と名づける。つまりアンサンブル ρ 中で一般に統計的分散を有する F なる量の平均分散度を ΔF とし、系を無意味に破壊しない（non-perturbing〔擾乱のない〕である）かぎり、最高精度の測定の許容限度を Δm とすれば $\Delta F > \Delta m$ なら separable、$\Delta F \leqq \Delta m$ ならこの量については non-separable とする。ノイマンでは後者は純粋状態まで徹底されたので

あるが、それが前述のごとく不可であり、やはり統計的マトリックスで代表されなければならない。しかもそれはこの問題に関しては系の最も精確なる記述と考うべきものである。すなわち一個の物理的系の最も精確な知識が、単一の波動函数で規定されたごとく、統計的問題ではこの non-separable な系の統計的マトリックスが最高度の精確な表現であり、これで表現された集団は相互になんらの区別もない。さて、この統計的マトリックスの包容程度は、一般的判別法こそないが個々具体的な場合には大体それを決めることができるとして、エルザッサーはこれをブラウン〔運動〕の逆（ママ）の例で示している。

かくてわれわれは、この non-separable な統計的マトリックスによる記述をもって、対象の粗視的態様のほうから微視的態様のほうに前進したものであって、対象の素朴な古典的描像が暗黙に予想しているように「粗視的態様は微視的態様によって決定される」と考えるのとはまさしく逆である。われわれの場合のごとく記述のすべての要素が系を特徴づける粗視的量との関係によって決定される方法を、R・A・フィッシャーらの確率論における inductive inference〔帰納的推論〕(inverse probability) にならい「physical induction〔物理的帰納〕」とも名づくべきであろう。しかしてわれわれは以上の事態を一見すると、系の不決定を二つに分ち、一つは不確定関係から来て必然的なもの、他は集団を確定せぬため数種の純粋状態を纏めて考えるために偶然的なものと、二種類に考えたい誘惑を感じるが、上述の分析を深く考えれば non-separable なアンサンブルにおいてはかように分けて考えることはなんら物理的意味はなく、両者は一体として考うべきものである。かくエルザッサーは論じて、この考え方の自然な結果としてエントロピー増大の規則〔につい

て〕も、単に粗視的量のみを用いる解析的記述で満足して、従来のごとき微視的説明を放棄することを勧め、多分に現象論的方法への折衷的態度を表明している。

以上のごときエルザッサーの所論を考察すると、その最後の(たとえばエントロピー問題の)結論は別として、彼が「ボーアの生体の機能は物理的化学的分析を徹底すると破壊される」という補足関係とのアナロジーを、統計力学の対象たる複合系へ適用した意義ある事態に注目せしめたことを認めなければならない。しかしながら一般化された相互補足性のアイディアから出発しながら、その補足性の両側面のうちの集団の特性のみを強調し、せめて熱力学的には集団の特性を固持する必要があるというのなら首肯しうるが、要素的に分解しさることをもって一般的に物理的に無意味であるというのはやや行き過ぎた偏った見解と考えざるをえない。これは、彼がやはり多少偏ったシュレーディンガーの見地と共鳴しているところにも現われている。

エントロピー増大の法則に対する彼の平板化された証明で満足しきれぬのは、われわれのみではないと信じるものである。さらに一歩進めて言うことが許されるならば、はたして彼のいわゆるnon-separable な集団をより計算上精密に取り扱ったその粗視的結果が、実験的事実と食い違った結果を生ずるかいなか、〔それが問題〕である。もしそれが、フェルミやボースに対するボルツマンの統計のごとくならばエルザッサーの所論は、現実の問題に重大な進歩をもたらしたといえよう。しからずして結果はまったく同じであるとすれば、それは positivistisch〔実証主義的〕な認識論の空しき杞憂に終わるであろう。

(1) W. Heisenberg, *ZS. f. Phys.* 40, 501, (1926) P. A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* A. 112. 661, (1926)

(2) ハーテオレムと呼ばれているが、もちろんエントロピーと関係づけるため、彼の初めの論文では、Eという記号で表わされたが、これは Energie の記号と紛らわしいので語原の頭文字ギリシャ文字 η の大文字として H を使ったのだと聞く。

(3) この宿命的な戦闘の後にボルツマンもP・エーレンフェストもともに自らの生命を絶ったのは悲劇である。

(4) *Ann. d. Phys.* Bd. 83, S. 956

(5) 英国流の学者のいわゆる detailed balancing である。これが preservation of equilibrium と同等なことは、たとえば、R. H. Fowler : *Statistical mechanics* 2. ed. p. 659 (1936) にみられる。なおR・v・ミーゼスはその実証主義的確率論から彼のいわゆる「ergod 仮設を要しない H-Theorem」の証明に際して、この相互に逆向きの転移の確率の等しいことから出発した。ゆえに彼の立場はかくべつ興味あるものではない。

(6) *Vorträge über die kinetische Theorie der Materie und Elektricität,* (1913). S. 89 以下とくに§18—§20。スモルコフスキの例を詳しく証明したのは *Phys. Zeitschr.* 13. 1912. 〔S. 1069〕

(7) 科学 7. p. 527—8 (1937)

(8) J.v. Neumann *M. G. QM.* S. 159 ; E. C. Kemble, *F. P. Q. M.* p. 53

(9) というのは物理的に意味ある統計集団という概念が本質的にア・ポステリオリの性格を有するために、同じ統計的マトリックスで表わされる個々のサンプルをまとめて考えるためのア・プリオリな原理も、サンプルがどのくらい違っていたら集団から除外するかというような問題について、普遍的な判別法というものがありえないことである。

〔1〕 選集版では「相互排他的補足性Ⅲ—……」とあるが、「Ⅲ」は番号づけ未整理のままに残ったものと思われるのでここでは略した。

〔2〕 選集版では「古典力学運動の方程式が……」。

〔3〕 W. Pauli, *Sommerfeld-Festschrift*, S.30 (1928)

〔4〕 選集版では「……の仮定は更に……」。

〔5〕 J. v. Neumann, *Proc. Nat. Acad.*, Dec. (1929), Mar. (1930)

〔6〕 W. Pauli u. M.Fierz, *Zs. f. Phys.*, 106, S.572 (1937)

〔7〕 選集版では、「……大きな偏れ……」。

〔8〕 選集版では、「……場合には……」。

〔9〕選集版では「……フィエルツ）は、……」。
〔10〕後出（7）のほか伏見「エルゴードの問題」（岩波講座・物理学）（一九三九年）。
〔11〕Unzähligkeit〔數え上げ切れないこと〕の意か。
〔12〕N. Bohr, *Journ. Chem. Soc.* p. 349 (1932)
〔13〕選集版では「……の記述の特徴的な……」。
〔14〕選集版に2字分の空白があるが、ボーア講演の記事から判断すれば、とくに補う必要はない。
〔15〕W. M. Elsasser, *Phys. Rev.*, 52 p. 987 (1937)
〔16〕選集版では「……構巧化……」。

付録

〔＊ 以下は、日本科学社版によらず、原著（『日本数学物理学会誌』）によって校訂した。一字下げの箇所（二八一―二八二頁、二九〇―二九一頁、二九二―二九三頁、二九九―三〇〇頁）および§４は、学会誌では小活字で印刷されていた。〕

§1　相対論的量子力学と量子電磁力学[1]

(i) ディラック電子論の難問　一見すると相対性理論の根本要請と量子論のそれとは論理的に独立無関係で、したがって両理論はたがいに他を擾すことなく合成される ungestört interferieren[2] ものと考えられる。両者が古典力学を発展せしめ一般化した方向はまったく別であるから、両者の要請を同時に併わせて取り上げることはなんらの撞着を含まぬばかりか、かえって理論を精緻にし論理的に完全にするために必要なことと思われる。

すでに前期量子論においてゾムマーフェルトが（特殊）相対性理論の結果をもってボーアの原子構造論にほどこした修正は水素スペクトラムの微細構造その他の経験的事実に輝かしい解明を与え[3]、相対性理論の原子的領域における妥当性を鞏固にしたものであったが、さらに深く量子論の基礎的関係 $\vec{P}=\hbar\vec{k}$, $E=\hbar\omega$ ないしハイゼンベルクの不確定関係がローレンツ不変性を示すことは[4]、当初から量子力学の相対論的一般化の成功を期待せしめるものがあった。光速度に近い運動をする粒子（就中（なかんずく）、光量子）は非相対論的に取り扱えないという実際問題もこれを促進した。それにもかかわらず両理論の綜合は簡単にはおこなわれなかった。

ディラックは量子力学と相対性理論の困難をまず両理論の数学的形式のうちに観取した。すなわち前者の波動方程式はオペレーター $\partial/\partial t$（あるいはW）について一次であることを要求されるに対し、後者はその二次型で定式化されている。たとえばゴルドンやクラインの電子方程式は後者を踏襲して、$\partial/\partial t$ について二次であるがこれがために電気量保存の原理と撞着する結果を生じている。[5] かかる考察から出発し、二次型の相対論的方程式をマトリックスの巧みな利用によりオペレーター $\partial/\partial t$ したがってまた $\partial/\partial x_1$, $\partial/\partial x_2$, $\partial/\partial x_3$ につき、線型に分割して得られたものが、有名なるディラックの電子方程式であり、これは合理的にローレンツ不変性を確保するのみならず、正しいスピンの値を「automatically〔自動的〕」に結果し非相対論的取扱いの不備を克服した。[6] さらに驚くべき理論的予見については後に述べよう。

ディラックの方法の演繹的・形式的な性格[7]とハイゼンベルクが量子力学の出発点で試みた実証的・対応論的 Korrespondenzmässig な取扱い方[8]とを比較対照することは方法論的に興味ある課題であろう。両者の方法の成功はそれぞれ地位を替えがたい必然性をもって理論の発展の一定の段階に対応しているのではあるまいか。少なくとも一面的な方法論上の主義を発展段階のいかんを無視して公式的に適用することはこの例に照らして拒けられるべきである。

他方においてディラックの理論は、彼自身も初めから認めていたごとく、**負のエネルギー準位**の出現という（ゴルドンらの理論にも存した）重大な難点を避けることができなかったのは周知のとおりである。これに対してディラックが求めた大胆な活路が、たちまち有名となった**空孔の理論**であった。世界のあらゆる空間は負エネルギー状態の電子によって無限に密に充填されているが、そ

の分布が正確に均等なためこれを観測しえず、またパウリの排他原理により、占有された負エネルギー状態へは正の状態からの転移〔は〕なく、わずかに残る空虚状態すなわちholes〔空孔〕はあたかも正エネルギー状態に在る＋e荷電の粒子のごとく振舞う[9]とはまことに凡庸の徒が企及しえざる天才的な構想であった。[10]

ディラックは最初このholesを陽子（プロトン）と解したが、間もなく正負粒子は理論上厳密に等質量でなければならぬことが証明され、[11]この解釈は放棄を余儀なくされてしまった。しかるに電子と等質量の正電荷の粒子は当時いまだ経験せられず、[12]幾度のパラドックスと相俟って負エネルギーの問題はディラックの理論の致命的欠陥と見られ、[13]相対論的電子論はここに救いがたい膠着状態に陥った。

かくて形式的なディラック電子論の出発点に対して認識論的批判が要望せられたのは、かつてのボーアーハイゼンベルクの測定問題研究の成功から鑑みても自然な成行きであった。

（ii） **量子電磁力学**　翻って相対論的取扱いを不可避とする電磁場の量子論の発展経路を一瞥しよう。アインシュタインが光量子のアイディアを提出したとき、この不連続説的見地は統計的解釈によってマクスウェルの理論の連続説的見地と調和しうるであろうとしたことはすでに書いた。[14]これは物質粒子像の統計的解釈とシュレーディンガー方程式との関係にアナロジーが見られ、[15]したがってマクスウェルの方程式、具体的問題としては空洞の電磁的固有振動へ量子力学の数学的手段を適用することは、その成果を期待せしむるものがあった。[16]ディラックはまず輻射の場を一つの力学系と見なし、それの原子系との交互作用をハミルトン函数で記述することにより、光の粒子・波動性

である。[17]従来、対応論的にのみ取り扱われた輻射理論の断片的成果が、いまや統一的な見地から（無限大を避け、多義性を除くために、しばしば特殊な人為的手段は必要であったが）ほぼ演繹的に導かれることとなった。

しかしながら形式的にはこれはさらに相対論的不変性を有する理論へ一般化されなければならない。ディラックおよびこれに相次ぐ諸家の理論では時間座標は空間座標に対し固有の特殊性を示しており、その結果は相対論的に不変とは見なせなかった。[18]ここにおいてヨルダン－パウリは時間空間をまったく対称的に取り扱い、少なくとも荷電粒子の存在しない場合に場の強さの交換関係を四次元的に対称な、すなわち相対論的に不変な形に表示し、真空場のマクスウェル方程式の量子化が事実相対論的に不変なことを証明しえた。[19]ただしこの対称的方法は非線型な場の方程式に適用しえず、したがって荷電物質の存在する場合には無力であったから、[20]ハイゼンベルク－パウリは対応論的立場から通常の質点力学のアナロジーをもって出発し、空間座標に対して時間座標を非対称的に取り扱う三次元の交換関係をもっても、相対論的不変性を失うことなく、[21]四次元的立場で行き詰った物質波をも取り扱いうる Formalismus〔理論形式〕を構成し、[22]ここに輻射および物質波動場の量子化[23]を一段落の状態にもたらした。この理論は量子力学およびディラックの輻射論を一次の近似の特別の場合として含む一般性を有し、従来の結果に対し、二、三の微細な改良[24]以外には実験的事実の解明に資すべき格別新しいものを結果しなかったが、理論的視野を広汎にし、数学的均整を増すの効果を有するものであった。[25]しかしこの労作をもってしてもディラック電子論の負エネルギー状

態の謎はもちろん、輻射場の無限大零点エネルギー[26]、電子の無限大自己エネルギーの困難[27]はいちだんと深刻化を加え、古典力学とマクスウェルの電磁理論の二元性は克服せられずに採用され[28]、さらにまた物質粒子と光量子に対し異なる統計法を使用する理論的根拠を示すこともできなかった[29]。ここにも基礎概念批判の必要が痛感されてきたのである。

ディラックはハイゼンベルク－パウリが場自身をハミルトニアン的取扱いの可能な dynamical system〔力学系〕とした点を批判し、場が観測をおこなう手段たる役目を有し、観測の本性そのものが場と粒子との交互作用を要求し、したがって場を粒子と同一の基礎に立つ系として粒子同様に観測されるかのごとく取り扱うのを不適当とし、新理論においては場は「より elementary〔要素的〕にして、fundamental〔基礎的〕なあるもの」として現るべきものとした。彼は場方程式の線型性が波動方程式のそれと深い関係があるらしいから、H－P理論にない「simplication〔単純化〕と unification〔統一化〕」を期待させるとした。彼の新説の特長は特異点を有せぬ輻射場のみを導入するという見地に立ちH－Pにおけるごとき二つの initial な〔初状態の〕場と二つの final な〔終状態の〕場に関連する諸量を許さず、それぞれの量を一つの場にのみ関係せしめ、量子力学の transformation〔変換〕の理論で二つの場に関連する量を導き出す点にある。この論文で各粒子に固有の「separate time〔固有時間〕」を使用し、粒子の交互作用は場の源泉の古典的表象から explicit〔あらわ〕に導かれるのではなくて場変数の量子化から直接出る。すなわち平面波に分解可能な場が電子間の通常の electrostatic〔静電的〕なクーロン力を与える

〔*Proc. Roy. Soc.* 136, p. 453（1932）数物会誌6、二〇五頁〕。

しかしながらL・ローゼンフェルト *ZS. f. Phys.* 76. 729（一九三二）がまず指摘したごとく外見はなはだ異なるディラックのプログラムの実現はまさにH－P理論で与えられるのである。ディラックが電磁場の特異点の存在と結び付いた量子電磁力学の難点を彼の方法で禁じうると期待したのは誤りであった。ついでディラック－フォック－ポドルスキ *Phys. ZS. d. Sow.* 2, S. 468（一九三二）が示したごとく、H－P理論と彼のそれとは簡単にその等価性が証明できるが、ディラックが場時間tの外に各粒子の固有時間t_sを導入した結果方程式の相対論的不変性は一目瞭然となり、H－P理論への転化はこれを $t=t_1\cdots\cdots=t_s=T$ とすればよい。

なお、この多くの時間t_sの物理的意味はF・ブロッホ *Phys. ZS. d. Sow.* 5, S. 301（一九三三）が論じた。結局各粒子の世界点が他の粒子の光円錐の内または上になければ、この形式でも通常の確率密度が云々できるのである。

また、ディラックが場の観測における根本的地位を論じたことはいささか肯定しがたい。反対にH・ワイルは *Was ist Materie?* S. 53 でわれわれの有意的行動はまずもって物質をとらえるのであり、これ以外には電磁場を生じたり、変化したりすることはできないから物質を場を生起する Agent〔動因〕とし場は物体の作用を他の物体に伝える外延的な媒体とする eine dynamische Theorie der Materie〔物質のひとつの力学的理論〕のほうが有望だとしている。

（1）　相対論的量子力学や原子核の理論は今日、非相対論的量子力学のごとく論理的に完結していない。これに加えて筆

者のこれらの領域に対する理解の貧しさから本論文はとくに粗略なものとなることは遺憾である。ここで紹介しえなかった統計力学（とくに H-Theorem）の問題とともに他日の増補を期する所以である。

(2) E. Schrödinger, *Berl. Ber.* (1931), S. 237 は両者の外見上の独立性にもかかわらず、その統一には概念的な困難があるとする。すなわち、相対論的基準系を構成するには仮想的実験 fingierte Experimente が必要であるが、それの許されること、および正確度は、量子力学の一般的原則で制限されている。ローレンツ座標系で座標と時間が定義される正確さは、いかに重い時計と尺度を用いるかによるが、原子的な長さや時間の範囲で、個々の電子や原子核に起こる事実を記述しようとする思考実験では任意に重い尺度や時計を用いることは許されないからである。したがって量子力学は相対論的拡張 Invarianz の要求の Diktatur にそのまま屈服せず、逆に、そもそも座標決定は要求された精密さで実行できるのかという反対要求をもってする。この見地からシュレーディンガーは、循環論法なることは自覚しつつも座標および時間測定の限界を与える式を導いている。

なお W. Pauli, Raum, Zeit und Kausalität in der modernen Physik, *Scientia* 59, S. 67 が古典物理学の論理的領域として、I $c=\infty$, $x=0$, $h=0$, II c 有限 $x=0$, $h=0$, III c 有限、x 有限、$h=0$ を区画表示し、来たるべき量子化を指示しているのもシュレーディンガーの所論と近い。

(3) A. Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*, 4, Auf. S. 408 f.

(4) Energie および Impuls に対する Frequenz および Ausbreitungsvektor の基本関係は $(\vec{P}, i\frac{E}{c})$ も $(\vec{k}, i\frac{w}{c})$ も一つの Vierervektor の成分を構成することから、その相対論的不変性が明らかとなる。Pauli, *P. W. S.* 215参照。なお不確定関係の Invarianz については N. Bohr u. L. Rosenfeld, *Zur Frage der Messbarkeit der Elektromagnetischen Feldgrössen*, S. 30 にも強調されている。

(5) 波動方程式が $\partial/\partial t$ について線型なら、これを満足する一定のときにおけるΨ函数は他のすべてのときにおけるΨの値を決定する。これに反し方程式が $\partial/\partial t$ について二次だと、Ψが一定のときに知れていても、このときの $\partial\Psi/\partial t$ はまったく任意であり、したがってΨは後のときに対して任意である。このためΨのみの函数なる電気密度は保存されなくなる。P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* 117, p.612 (1928) さらに詳しく *Phys. Zeitschr.* 29, S. 561 (1928)。また非相対論の場合と異なり、粒子の確率密度を二つの Ψ、Ψ^* で矛盾なく表わしえないことについては Pauli, *P. W.* S.216。

(6) P. A. M. Dirac, Quantum theory of the electron Ⅰ, Ⅱ, *Proc. Roy. Soc.* 117. p. 610; 118, p. 351 (1928) かの観測せられる原子の定常状態の数が一つの電子について従来の理論の与える数の二倍であるという、いわゆる「duplexity」の現象を Goudsmit-Uhlenbeck にならい、spin を導入して解決せんとしたパウリやダーウィンの式はローレンツ変換に対する不変性をもたなかった。この困難を切り抜けたゴルドンやクラインの式がまた上述の難点を担っていた。なお *Phys. Zeitschr.* S. 561 (1928) をも参照。

微細構造の原因として電子の spin が相対性理論によるものとあらゆる点で同一の法則を与えることはまえから知られていて、spin と相対性理論との深い関連を暗示していた。しかし当時のモデル的考え方では相対論的説明は軌道の形状について困難を生じるので採用できなかった。R. A. Millikan, *Electrons* (+and−) (1935) p. 291

(7) ディラックは Quantised singularities etc. *Proc. Roy. Soc.* 133, p. 60 (1931) なる論文の冒頭で、古典理論物理学と近来のそれの発展の様式について興味深い対照をなし、前者の進歩はますますその数学的複雑さを加えつつもその公理と定義は不変の基礎をなしているが、後者においてはたえずその数学が基礎を変じ、ますます抽象化していくことを述べたのち、今日もまた基礎概念のさらにドラスティックな革命を要するが、実験的データを直接数学的に定式化して新たなアイディアを得るのは人間知能を超えるぐらい大きな変化が期待されるので、むしろ将来の理論家は純正数学のあらゆる手段を利用して現在の理論物理学の基礎をなす数学的形式を完成し一般化し、かくして成功した後に新たな数学的形態を物理的事物に解釈するのが最も有力な進歩の方法であると論じた。対応論的方法と対蹠的な見地である。彼はすすんでこの解釈法をエディントンの Principle of Identification に類似するものとし、エディントンの proton-electron mass ratio の取扱いのごときにも同感を示している。これについて *Nature* 139, p. 323 (1937)、また電子方程式から時の過去・未来の非対称性が出るかにいわれたこともあり (Dirac, Phys. Zeitschr. 29, S. 563 (1928) の最後)、また H. Weyl, *G. T. Q. M. 2te Aufl.* S. 234 (1931) は、この問題を場の理論と結びつけているが、これは物理的に解釈し難い。

(8) もとよりこれはディラックの電子方程式が対応的解釈を許さないというのではない。事実この方程式はその近似として粒子が古典的運動方程式で定義された軌道を進むことを結果する。W. Pauli, *Helv. Act. Phys.* 5, S. 179 (1932), また *P. W. S.* 241 ただし spin を古典的・機械的な回転運動とすることは「mechanical picture の正当な使用の限界を超えたもの」であり、古典的軌道概念を直接追求しつつおこなう (Stern-Gerlach 型の) 実験では電子の magnetic-moment はけっして測定されない。Bohr, *Journ. Chem. Soc.* p. 367 (1932). *Atomtheorie u. Naturbeschreibung* (以下 *AT. NB.*) S. 9, Pauli, *P. W.* S. 241 f. spin はむしろ量子物理的相対性効果と見る

べきものである。Jordan, *A. QT.* S. 212

(9) P. A. M. Dirac, A theory of electrons and protons, *Proc. Roy. Soc.* A. 126, p.360 (1930) 数物会誌3、四一一頁。

(10) ボーアはかかる考察を「対応的論法の適用性の限界を超える」ものではないかと疑っている。*Journ. Chem. Soc.* p. 378 (1932)

(11) ディラックは(9)の論文で電子間の交互作用から正負粒子に非対称性を来たし、陽子と電子の質量の差異を生じるという着想に期待したが、これは撤回された。等質量の論議は Weyl, *GT. QM.* 2te Aufl. S. 234 (1931), Dirac, *Proc, Roy. Soc.* 133, p. 61.

(12) 最も有名なのはO・クラインのパラドックスである(*ZS. f. Phys.* 53, S. 157. (1929))。すなわち、電子は適当な条件のもとでは正エネルギーの状態から負状態へ転移する有限の確率を有することがディラックの理論から結果するのである。Pauli, *P. W. B.* § 5, *Helv. Act. Phys.* 5, S. 179 (1932)

(13) Pauli; *P. W. B.* § 5 は、ディラックの理論の hole で解すると結局γ-量子が electron と antielectron へ転じうることになるから、それは真面目な考察に値しないと述べたが、アンダーソンの陽電子痕跡の写真はこのときすでに撮影されていたのであった。これらの事情はのちにも触れるごとく、いかに陽子と負の荷電の電子のみが素粒子であるという観念がわずか二〇年ほどの間に深く根を下ろしていたかを物語るもので、理論家の浅見と責めるは酷であろう。

(14) 本報告1、数物会誌10、四四六頁(本書五〇頁)。

(15) ここでマクスウェルの場とシュレーディンガーの波動との主な区別をあげると、まずマクスウェルの場に対しては reel な波動振幅$\mathfrak{E}$、$\mathfrak{H}$が用いられるのにシュレーディンガーのΨは Komplex である。この結果 Eichinvarianz に関する両者の性質にも差異が生じる。しかしてシュレーディンガーのΨが多体問題で高次元になるのに対し、マクスウェルのほうは多くの光量子に対してもつねに三次元である。いな、すでにシュレーディンガーのΨを単体問題へ対応せしめるごとくマクスウェルのそれを「Ein—Lichtquantproblem」(ひいては一定数の光量子)へ対応させることからして、まったき誤謬であろう。回折実験で粒子相互の作用を無視した場合、物質のΨ-Strahl では粒子数を統計的に計算できるが(非単色)光線ではエネルギーは計算できても光量子数は得られない。Jordan, *A. QT.* S. 207 参照、さらに(少なくとも非相対論的量子力学等で基本的であった)物質粒子の位置確率に相当するものは、幾何光学の限界を超えた場合には光量子には存在しない。光量子の位置なるものは「Transformationstheorie の意味

で、けっして Observable」ではないのである。なぜなら光量子では $|\Delta x| > \frac{hc}{E} \sim \lambda$ であるから、Landau-Peierls, *ZS. f. Phys.* 69 § 7 (1931) : Jordan ; *A. QT.* S. 206, 光量子に対しては連続方程式を満足し、positive definit な密度を有する Dichte-Strom-Vierervektor は全然存在しないのである。Pauli, *P. W.* S. 260—261 一般に S. 92 参照。

(16) P. Jordan, *A. QT.* S. 215—216

(17) P. A. M. Dirac ; *Proc. Roy. Soc.* 114, p. 243, 710

(18) これは非相対論的量子力学において時間のみが c-number であったこととは別で混同してはならない。

(19) P. Jordan u. W. Pauli, *ZS. f. Phys.* 47. 151 (1928) ヨルダンはヴィグナーとともに物質波すなわちΨの量子化いわゆる Zweite Quantelung〔第二量子化〕をこの以前になしとげている。

(20) P. Jordan, *A. QT.* S. 237. f. 四次元的交換法則はまったく場の方程式の形に依存し、その explicit な表現はもしその微分方程式が explicit に積分されなければ不可能である。

(21) W. Heisenberg u. W. Pauli（以下、H-P）Zur Quantentheorie der Wellenfelder Ⅰ Ⅱ, *ZS. f. Phys.* 56, S. 1 ; 59. S. 168 相対論的不変性の説明はヨルダン－パウリの四次元の場合のごとく一目瞭然でなくそうとう複雑な手続きを要する。すべての場所における場量 $u(\mathrm{r}), \dot{u}(\mathrm{r})$ を一定の時点 $t=0$ について知れば、場方程式から任意の時間の $\mathbf{u}(P)$ を、したがって t、t' における $u(P)$, $u(P')$ が得られるので H－P もヨルダン－パウリの交換関係と等価である（Ⅰ）§ 5 Jordan. *A. QT.* S. 238 なおここで場の強さ等の物理的量は一般に非可換的なマトリックスであるが、x_1、x_2、x_3、t はすべて c-number であることを注意しておく。

(22) H－P理論とヨルダン－パウリのそれとの比較はH－P・Ⅰ、§5。

(23) アインシュタインが提出した重力場の量子化もこれとアナロジーでできる見込みがあるという。H－P－Ⅰ

(24) ディラックの理論（注17）は輻射場と物質粒子との交互作用が小さな擾乱と見なされる近似に相当する。なお、H－P理論から出る卑近な例をあげると、電荷が、ある単位電荷の整数倍なるべきこと、クーロン力等である。H－P－Ⅰではまた Auger 効果のある微細な性質、Ortho ヘリウムの微細構造の説明可能性が述べられた後、いまでは不適当なβ線放射の理論が触れられている（§9）。

(25) P. A. M. Dirac ; *P. QM.* 2nd ed, p. 273 なおディラック（注17）の場合にきわめて人為的であった規約（たとえばクラインの Vorschrift のごとき）が多少自然になったのは事実である。

(26) これは結局、波動力学的方法を無限に多くの自由度の系に適用すると対応論的に許される範囲を超えるために困難を生じる一つの例と見られているが (Pauli, *P. W.* S. 256, 272)、この場合には零点エネルギーは吸収も散乱も反射もされず、なんらの重力場も生じないので、あらゆる検証の可能性を欠くから、物理的実在性を有せず、普通簡単に無視してしまう。Jordan-Pauli (注19) S. 153, Pauli, *P. W.* S. 250。

(27) これは今日といえども (ボルンの場合を除き) 解決されていないきわめて厄介な問題である。電子の自己自身の場と交互作用のエネルギーが無限大となることは、古典理論のごとく単に電子を点状にするために生じた singularity のみではなく、量子的領域とくに相対論的な場合にいちじるしい困難を生じ、このために相対論的量子力学の一般的な遂行に支障を来たす。W. Pauli, *P. W. B.* § 8, なお W. Heitler, *The quantum theory of radation* (1936) § 24に相当まとまった限界づけと批判が見られる。また (本書付録§3、注10) を参照、また量子化によって一つの光量子によりつくられた重力場の無限大自己エネルギーが出てくることは、L・ローゼンフェルトらが論じた。

(28) 現代の理論は二つの論理的に独立な古典理論から物質粒子の波動力学と輻射の場の量子論を発展せしめているが、その基礎の統一は達成されていない。W. Pauli. *P. W.* S. 272 これは単なる数学的手段の一般化では達成され〔てい〕ない。J. A. Schouten, *Ann. d. L'Inst.* H. Poincaré. V の論文の結論。

(29) H-P、I§4 なお Jordan, *Ergeb. exakt. Naturwiss.* 7, S. 206 (1929) は光量子を電子対から合成されたものとして、そのボース統計を説明した。ただし、交換関係に照らし光量子についてボース-アインシュタイン統計法が成り立つことは、異なる場所の電場と磁場の測定が独立であるという自然な仮定をすれば、必然的となる。Pauli, *P. W.* S. 258 また、Ψ と Ψ* が、フェルミの統計では異なる場所でも同時に測れぬのは、Ψ が実験的に測れぬ以上、当然なことである。Heisenberg, *P. QT.* S. 39—40

§2 批判と反批判

ディラックの電子論とハイゼンベルク－パウリの量子電磁力学が逢着した以上のごとき難局に直面して、これらの理論がその建設にあたって、基礎概念の物理的意義の反省を欠き基本的量の測定可能性の問題が閑却されていた事情に批判が加えられたのは、けだし自然の成行きであった。

ランダウ－パイエルスの研究を頂点とする諸家の批判は主として（非相対論的量子力学の場合の）ハイゼンベルクの思考実験を範とし、それに相対論的な制限として光速度の有限性等の事実を加味し、上記理論の基本的諸量が測定可能性を著しく制限されていることを明らかにする方向に向けられた。いまだ陽電子の発見なく、β線連続譜の解明に曙光を見出しえなかった当時の批判が、否定的・破壊的な色彩を帯び既存の理論を根底から覆すごとく革命を要望したのもまたやむをえない。[1]

ランダウ－パイエルスはまず voraussagbar〔予言可能〕な測定[2]が量子力学に欠くべからざる所以(ゆえん)を論じたのち、光速度を無限大と見なしえない相対論的領域では、物質（とくに荷電）粒子の運動量、（および光量子の）位置、電磁場の成分等の測定が非相対論的領域において例を見ない著しい

制限を受け[3]、その結果「波動力学の意味におけるなんらの物理的量もなんらの測定もない[4]」ことを見、かくて当時の理論が、「あらゆる Unendlichkeit〔無限性〕へ導いても驚くにはあたらず、反対に、それが現実となんらかの近似性をもつとすれば驚くべきことであろう」と論結した[5]。

これらの論議に総括的再批判を加うべくボーア－ローゼンフェルトは「電磁場量の測定可能性の問題について[6]」周到にして精密なる考察を試み、従来の破壊的な論議の欠陥を指摘して、それらの結論を覆し、量子電磁力学の形式が物理的に基礎づけられている所以を論証しえた。彼らによれば、あたかも量子力学が古典力学の転釈として運動学的および力学的諸量の不確定関係によってその形式の物理的無矛盾性を保証せられたごとく、場の量子論は古典的電磁場論の対応的転釈として場の測定の可能性によってその形式、就中(なかんずく)場成分の交換関係が物理的に基礎づけらるべきである。ランダウ－パイエルスが帰結した場の理論と原子論との矛盾は、主として、H－Pの量子電磁力学がそれ自体としては物質の原子的構造の問題とは無関係で、両者は明瞭に分離して論究せられるべきものである点を十分認識しなかった結果による[7]。この両者を混同し、場の測定に使用される Probekörper〔プローブ、探針〕を**点荷電**として[8]、また、場を理想化して時空**点**におけるものとすれば矛盾は避けられないが、いまもし原子的拡がりに比して十分大なる Probekörper をもって、そうとうの拡がりある領域についての場の量の平均値にあたる**領域函数**としての場成分の測定可能性を問題にするならば（測定器械の原子的構造に由来する制限を度外視しうるかぎり[10]）、場の量子論の形式と測定の思考実験の結果とは完全に一致することが証明できる。この論究の結果として、非相対論的量子力学の測定問題には見られなかった新たな相反補足関係もあらわれてきた。たとえば、

多くの場の測定の相関性により、一般には、異なる時空領域における測定を一義的に時間系列に対応せしめえないごときもその一例であるが、就中（なかんずく） Propekörper の避けがたき電磁作用により測定結果が unkompensierbar〔補償不可能〕に影響されてしまうのは、測定の客観性を傷つけるかに見えるが、[11] 量子論における理論的命題の原理的に統計的な性格を想えば、これを、測定すべき場に包含される構成部分と見なすとも、必ずしも場の平均値の問題の解明を妨げないであろう。さらに、二つのほとんど合致した時空領域では二つの測定結果が任意の近似で得られることは、一時危ぶまれた**測定の反復可能性**の要求もまた充たされることを立証する。

この研究の結果によれば、量子電磁力学の形式からするも測定の思考実験からするも、上述のごとき適切なる注意のもとでは、同じ時空領域内のすべての場成分の平均値は相互に可換であり、したがって相互に無関係に測定しうることが知られる。[12] これはハイゼンベルクが以前に導いた異種の場のたがいに直角な成分のあいだの不確定関係[13]を覆すものである。またランダウ－パイエルス（以下L－P）はまず荷電物体についてはそれの輻射の反作用のため運動量測定は通常の不確定関係よりもさらに狭い制限を受け、その結果としてこの測定を利用する場の測定についても場量がそれぞれ不確定となる（静電磁場は別）結果を出したが、これは荷電体を点荷電とし、かつ測定時間Δtと場量の求められる時間間隔Tとを混同したために生じたのであり、ハイゼンベルクもL－Pも点荷電としての Probekörper の位置の不確定と測定さるべき領域の長さと同一視したが、これも測定可能性の問題と無関係な仮定である。ただしパウリがL－Pの論議を批評して、

運動量測定の際の輻射を測ればよいとしたのは、[14] 測定さるべき空間領域が時間間隔に比してそうとう大きい（$L>cT$）場合には測定前後の輻射が相互に区別できなくなるから、実行不可能である。

なお、L－Pが光電子の位置測定の制限を論じた点、および Schwankung〔ゆらぎ〕のため一定の時空領域における電磁場の光量子的組成と場の成分の平均値との知識は相互に排斥すること[15]も、理論の形式と一致こそすれ、矛盾はないのである。

これを要するに、量子電磁力学においても測定過程と現象との不可分離性や、測定結果が測定そのものをまってはじめて創り出される等、すでに量子力学で出会った事態がふたたび現れるが、これに加えて複雑なる測定機構の注意深い取扱いを要することは、その形式が積分形を含むために生じた余儀ない事情である。

かくてこの理論の測定問題に関する無矛盾性は以上の論議によって完全に立証されたが、これは形式の対応論的出発点を想い合わせれば当然のことと も考えられるのである。しかしながら場の量子論の物理的アポロギーとして見事なものであったボーアーローゼンフェルトの研究も彼ら自身がすでに強調したごとく現在の理論は$e^2/\hbar c$が1に比して無視しえられる場合にのみ有効であり、電子の古典半径に比して大なる波長の問題に制限せられ、電子の荷電、質量等の普遍常数の理論的根拠や無限大自己エネルギーの問題にはなんらの解明を与えない事情を動かすことはできなかった。これらの問題は古典理論の量子論への移行、すなわち測定にともなう擾乱を考慮に入れることをも

ってはいまだ毫（ごう）もその手懸りを見出しえず、本質的に新しい物理的概念が要望される所以（ゆえん）である。[16]

ボルンの統一場理論[17]　elementary〔要素的〕な粒子を点状として取り扱う理論に避けがたい自己エネルギーの無限大を逃れる一つの有名なる企ては、マックス・ボルンによって予告され学界の大きな期待のうちに発表された一元的電磁場論である。上述のごとき既存の量子電磁力学が、物質粒子を電磁場とは本質的に異なるものとする二元的な観念に応じて、シュレーディンガーやディラックの物質場にマクスウェルの電磁場を重畳する結果、各種の粒子についてそれぞれ異種の場を生じ、それらが別個に考察された法則で結びつけられることに飽き足らず、ボルンは唯一種の場を想定してそれの singularity〔特異性〕が粒子の役割を演ずるごとき[18] unitary theory〔統一理論〕を構成しようとした。[19]

これがためにおこなわるべきマクスウェルの理論の修正は、場は無限大とならずといういわゆる principle of finiteness〔有限性の原理〕に導かれて「maximum〔極大〕（ないし absolute〔絶対〕）field〔場〕」の観念により、metric〔測度〕および電磁場のテンソルに関する比較的自然な仮定と相対論的不変性につきマクスウェルの理論のラグランジアンの修正形を得ることに存する。[20] この結果としてまず古典的領域では、電子（むしろ一般素粒子）の半径の有限性およびエネルギーの有限性を得、電子の拡がりに比して相当大なる距離でクーロンの法則と一致するポテンシアルを証明し、さらに量子的領域に進んでは系のエネルギー的中心が自由粒子の量子力学（じつはゴルドン－クラインの方程式）にしたがうという結果を導いた。[21]

このボルンの演繹的な統一場理論がはたしていかなる成功をもたらすかはその量子的部門において検証されるのであろうが、それについてはまだ実験的に判決されるような確然たる結果が得られていない。これが一般から正統派の理論として見られないのは、経験的事実に立脚せず、むしろきわめて抽象的な要請から出発しているその方法的見地にもよるが、一つの試みとして将来の理論のために捨石の役割を演ずるにすぎないのではないかとの憶測も禁じえないのである。

（1）したがって客観的状勢の一変した今日、論理的厳密性と公平とを欠く紛々たる諸説、種々雑多な「不確定原理の相対論的拡張」をいちいち取り上げるのは、とうていその煩に耐えない。ここでは多少 pathologisch〔病理学的〕な興味も含まれるがなんらか教訓的な例のみを考慮する。
なお、非相対論的量子力学から得られた不確定関係と、古典的相対性理論の結果たる光速度の有限性とを単純に結合し、かくして得られた式から、従来の理論の基礎概念を吟味し、基本的量の判定可能性を批判するのは、いささか petitio principii〔前提の証明を要する推論〕のきらいがある。したがってそれらの式は、ハイゼンベルクの不確定関係に比し、はるかに論理的必然性に乏しい provisorisch〔一時しのぎ〕な性格をもつと考うべきである。cf. E. Schrödinger; *Berl. Ber.* (1931) S. 238

（2）本報告Ⅱ、数物会誌11、六三頁（一九三四）〔左掲（5）その他〕。

（3）この議論の内容はボーア－ローゼンフェルトのこれに対する批判とともにのちに述べる。

（4）いわく「もちろん、系を測定器械と交互作用させて、その場合器械が何をするかを問うことはでき、理論はこの実験の結果に対する確率を与えるであろう。しかしこれは、研究されている系のパラメーターに対する確率として解釈されることはできない。なぜなら確率が一定の結果に対して1で、他のすべてに対して零であるようにはできないからである」。注5の論文の§8。

（5）L. Landau u. R. Peiers, Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie, *ZS. f. Phy.* 69, S. 56 (1931)〔以下 L. P.〕。この有名な論文が電子の負エネルギー状態や、β線連続譜

の困難を背景にしていることは見逃せない。

(6) N. Bohr u. L. Rosenfeld. Zur Frage der Messbarkiet der Elektromagnetischen Feldgrössen, Danske Videnskabernes Selskab, *Math-fys. Med.* XII. 8 (1933) この論文は測定問題一般についてすこぶる教えるところが多い。

(7) H. P. の場の量子論の形式中にある普遍常数は光速度と作用量子で、素粒子の単位電荷や静止質量は入っていないのでなんら特定の時間的拡がりが限定されない。そこにこの理論の無矛盾性の証明がまだ残された問題の解決に遠い所以もあるのである。

(8) 点荷電とすると輻射反作用が大となり、$\frac{e^2}{\hbar c} \ll 1$ が成り立たない。

(9) 交換関係の中にδ-函数が出てくるのからも積分が要求されているのが観取される。

(10) N. Bohr, *Nature* 138, p. 25 (1936), *Enkenntnis*, 6, S. 293 (1936) および Heisenberg, *Wandlungen* u. s. w. 2te Aufl. S. 62 が、電子の存在のごとき事実を理解するには、古典的記述法で実験結果の解釈に際し測定器械の原子的構造を度外視していたのを制限せねばならぬとし、物質粒子の相互影響やそのもの自身の安定性を考慮すべきを予想しているのも、これと関連がある。ここでは Probekörper の原子的構造を度外視しているのである。別のことであるが「古典理論は固体の存在を説明できない。ところが現象を時空的に排列せんとするすべての測定は結局この固体の存在に頼っている」(Bohr, *Naturwiss.* 21, S. 246) ことも反省を要する。

(11) Probekörper の場の量子現象特有の Schwankung〔ゆらぎ〕は、適当な手段で kompensieren〔補償〕できるそれの古典的の場とは異なり、純粋の空洞輻射の Schwankung と分離できない。この事情は非相対論的量子力学の波動函数の統計的解釈にあらわれたものと同様である。〔本書§12参照〕。

(12) これはより一般な次のごとき事実の特殊の場合である。すなわち任意の二つの空間領域における同種の（二つの電または磁-）場成分の平均値は相当する時間間隔が合致すればつねに可換であり、また任意の二つの時間間隔における二つの異種の場成分の平均値は相当する空間領域が合致すればつねに可換である。なお、ディラックは B. R. とは異なりδ-函数を残したままの交換関係について論じているが、要するに二つの時空点のいずれもが他の光円錐の内または上になければ擾乱の伝播が光速度で制限され、他を擾さずに一方で測れるから、相互に可換であるという。*P. QM.* 2nd. ed. p. 274

(13) W. Heisenberg, *P. QT.* S. 39 これは Grenzübergang〔極限移行〕の手続きが正しくなかった。

(14) W. Pauli, *P. W.* S. 257. *B. R.* の S. 26 参照。
(15) *B. R.* S. 15.
(16) B. R. の序論および Dirac, P. QM. 2nd ed. の最後の頁、二九七。
(17) M. Born, On the quantum theory of the electromagnetic field, *Proc. Roy. Soc.* 143, p 410 (1933) において、初めて纏まって発表された。その後しばしばL・インフェルトとの協力その他により改良が施され今日に及んでいるが、International Conference on Physics, London 1934, *Papers & Discussions* Vol. 1, Nuclear Physics (1935) にも「Quantum Electrodynamics」なる題目のもとに彼の手になる綜合報告が書かれている（数物会誌9、二九頁（一九三五)。
(18) 周知のごとくこれはA・アインシュタインによってしばしば企てられたことであるが、ボルンの意見では、電子の安定力としてのcohesive force を重力と結び付けんとするアインシュタインの統一場理論は電気力と重力との作用の比が10^{40}にもなることを思えば wrong track に踏み込むものである。二つの電子間に作用する力を一部分だけ分割してそれを重力として立証するのは不可能事であり、重力は場の elementary law〔基礎法則〕とすべきでなく、多数の粒子によって構成された全体としての中性な物体にとって初めて可能になるものであり、世界およびその中の粒子数の有限性と関係ある小さい「difference effect」と考うべきものである。この意見の正否とは別にW・パウリは重力論の常数 κ が正であるのは他の自然常数が平方なのかも知れぬとしている〔*Scientia* 59, S. 76 (1936)〕。
(19) これはG・ミーの一般場理論（一九一二—一三）の特殊形としてミーの理論の欠陥を修正しつつおこなわれた。
(20) N. Born & L. Infeld, *Proc. Roy. Soc.* 144, p. 425 (1934)（数物会誌8、三〇七頁（一九三四)）。
(21) ボルンが彼の理論の古典的な場合に遠距離で電子を輻射の中心と見なせる弱い場として光波がそれの独立な構造をもたぬことから、量子論でもそのとおりで photon は「physical reality」ではなく数学的構成物と見なすべしとしたのは、補足原理の立場からはやや物足りぬ。*Proc. Roy. Soc.* 143, 434 (1933) 参照。また電子の有限の大いさ、その半径がはっきりした値を有することは物理的にいかなる根拠づけが可能であろうか、さらに電子内部の場のごときはますます奇怪である。かりに補助量としてそれらに相応ずる量を利用しうるとしてもこの対応的意味づけは物理的に十分な根拠を得られまい。

§3　核物理学における二、三の問題

原子核の理論として一九三二年以前にわれわれに知られていたのはα-放射能に関する量子力学の応用以外は主として phänomenologisch〔現象論的〕な Systematik〔系統学〕であり、これも少なからぬ例外に悩まされていたうえに、有名なβ-線連続スペクトラムの難問は、従来の量子力学の基礎概念に革命的な変更を加えずしては核の理論的取扱いは不可能なるかのごとき意見を蔓延せしめる結果となっていた。[1]

しかし真実の解決の端緒はまったく別な意外な方面から与えられることになった。すなわち相次いでおこなわれた中性子（チャドウィク）、陽電子（アンダーソン）、人工放射能（キュリー＝ジョリオ）等の発見は、ようやく進歩しきたった原子の人工崩壊の技術と相俟って、嵐のごとく実験物理学の威力を示し、たちまち難問を裁断して理論的研究を瞠着たらしめるかに見えた。たとえば中性子の核構造論への著しい寄与、さらにこれにもまして、物質粒子の破滅という結果により致命的と見られる重荷を負ったディラックの電子論（空孔理論）が陽電子の発見によって達成した理論的飛躍は、物理学史上まれに見るものであったがいずれも上記の実験の恩沢によってのみ可能であっ

た。かくてまず経験的事実を収集せんとする研究者が滔々として実験物理学に馳（はし）ったのも必ずしも誤れる態度ではなかったが、しかしこの事実は理論の力を貶（おとし）めるものではなく、かえって、仔細に如上の発見の経路を検窺する者は、そこに理論的考察が重要なる役割を演じているのを見出すであろう。[2] まことに今日の原子核および宇宙線の物理学におけるごとく理論と実際とが相互に浸透しあい一歩一歩に密接不可分の共同作業を遂行しつつあるのは、かつて例を見ないところである。[3]

中性子を核の基本構成単位として、核内粒子間の交互作用等の理論的研究[4]に先鞭をつけたのはハイゼンベルクの功績であるが、フェルミのβ線放射能の理論[5]もこれから出発している。エネルギー保存則は物理学の全領域を貫通する原理として各種の現象形態を統一し、その相互転化を量的に法則づける方法論上重要なる地位を占めている。これを確保することは、きわめて一般的な意味での因果律の確保とほとんど同等の高い意義を有するのである。[6] さればフェルミがパウリの着想を採用して、あえて未発見のニュートリノをもってエネルギー保存則を満足するごとき理論を構成せんとしたのも了解に難くはない。彼の理論においてプロトンとニュートロンとが二種の固定的・不変的な粒子としてでなくむしろ基本的重粒子の二つの異なる状態として捉えられていることは、[7] 電子の発射が creation〔創成〕と見られ光量子とアナローグに取り扱われるの[8]と相まって古い原子論の硬化した観念を打破するといえよう。一方ニュートリノの「存在」は今日では理論的にも実験的にも「circumstantial〔場合ごと〕」には肯定されているが、[9] 核内交互作用の法則[10]が十分明らかでないためにフェルミおよびその修補としてのコノピンスキーとウーレンベックの理論から恣意性を除きえず、[11] 量子力学の Formalismus〔理論形式〕との矛盾すら指摘せられて、理論的に難点を有すると[12]と

もに、実験的にはニュートリノの「検出」が今日の技術ではほとんど不可能であり、[13] また理論の証明の重要なる材料たるβ線エネルギーの上限がきわめて不精密にしか測られていないため、[14] いまだニュートリノの諸性質[13]には多くの曖昧さがつきまとっているのを否定できない。ここでも多数の研究者の進みつつある方向のうちに理論と実験との密接なる相互刺戟が見られるのである。これは核構造論、とくに軽粒子の取扱いにおけるフェーンベルク、ヴィグナーその他の**半経験的**なモデル的考察の場合においても著しい。理論の生成過程の一特徴とも見られる。[16]

他方において核の外部的衝撃による反応は従来の方法に対して大きな困難を提供する。核のごとくそれを構成する粒子が「close に packing〔密につめこみ〕」されているところでは、原子の外包の電子に対しておこなわれたごとき単体問題の結合としての近似（ハートリーの方法）は効果的とは考えられない。[18] ボーアが核構成粒子間の交互作用の本質的に「collective〔集合的〕な aspect〔見地〕」を出発点から用うべしとするのもここに根拠がある。しかしわれわれは物質の「extra-ordinary dense〔異常に密〕な状態」の知識はほとんどもたないので彼はまず液滴状モデルに熱力学に類似した考察をほどこして、意義ある結果を得たが、[19] とくにニュートロンを主とする核反応については、従来の「**開いた系**」としての原子外包の粒子への衝突の取扱いに見たごとき当事者のみのあいだの孤立的作用の観念を斥けて「**閉じた系**」としての核の粒子集団内の緊密なるエネルギー分配を考察して見事な出発点を創った。ボーアによれば「mechanical aspect〔力学的見地〕」では、原子外包の化学的性質を知りえたような単純性に欠けている核も、核反応では中間段階を想定することにより、mechanical behaviour〔力学的ふるまい〕には簡単な類比のないくらい精妙な facility

〔効用〕を示すことができる」のである。[20] 今日、しだいに数学的に精密化されつつあるこれらの方法がどこまで推進力をもつかは興味ある問題である。おそらくこの対応論的な量子化が原理的に新たな理論で統一されるのであろうが、この意味で今日の原子核理論の状勢は、あたかもかつての量子力学の誕生前夜のごとき予感に緊張している。ただ、当時の課題は「転釈」であり、基本的な量の計算法則の確立であったが、今日はむしろ、核内の力の法則そのものを見出すことが問題であり、ここにいっそう着実な実験的・理論的研究が要求される所以である。[21]

陽電子理論と真空電磁力学 ディラックの電子論の注目すべき結論たる電磁場のエネルギーと物質との**相互転換**[22]が実験的に確証された結果、世界のあらゆる空間において負エネルギー状態にある無限個の電子が真空の性質にいかなる影響を及ぼすかは興味ある理論的問題となった。マクスウェルの方程式の線型性は、場が相互に無関係に重畳しうることを意味するから、従来、真空はそこに存する場とは無関係に自由に光波を通過せしめるものと考えられてきた。しかるにγ量子が真空内の場で吸収されるという現象はマクスウェルの電磁力学からの重大なる偏倚を示すものといえる。たとえ光電子が場で吸収されて電子対を生成するに十分なエネルギーをもたぬとしても、なおいわゆる「真空の polarisation〔偏極〕」により散乱屈折をこうむるであろう[23]とは想像しうるところであるが、これはまさにディラックの相対論的電子論から導かれるところである。しかしてこの同じ理論が「真空電子」の根本仮定に基づく計算により、陰陽電子対の生成と消滅について実験と一致する結果を生じる以上、電磁場による光の屈折、光による光の散乱等に関するオイラー－コッケル、ハイゼンベルク－オイラーの研究も無意味とはいえない。ことにヴァイ

スコップが真空電子について生じる無限大の電荷、電流およびエネルギー密度を取り除くために提出した仮定は、物理的意味のある真空電子の作用をすべて考慮に入れたすこぶる自然なものであり、恣意を含まずしてしかも konvergent〔収束的〕な結果を導くので、この理論は信頼度を加えるのである。すなわち陽電子の空孔理論は量子化されていない波動場を取り扱うかぎり電子論に対してなんら本質的な困難を起こさないと結論できる。ただここに注意すべきは、この理論によるマクスウェル理論の修正は電子対生成の virtual〔仮想的〕な可能性の間接的**結果**として導かれたものであって、ボルンの場理論におけるごとく**出発点**となってはいないことである。一時オイラーやハイゼンベルクによって注意せられたごとき両者の修正の程度上の類似性も、ヴァイスコップによれば、まったく外面的のもので、陽電子論に基づく修正はきわめて小さいので、電子の自己エネルギーの問題でボルンの理論のごとき役割を演ずる見込みはない。それにもかかわらず、実験と関連性をもつ点は陽電子論の強味として認められている。それはいずれにせよ真空中の輻射過程は物質過程と完全に分離するをえず、古き真空と物質との絶対的対立は意味を失ったと考うべきである。[24]

(1) これは、かつての量子力学建設当時の事情を目のあたり見たものにあってきわめて自然な成行であった。物理的には電子の核内存在という前提が大きな矛盾原因であった。これに対する批判的見解もないではなかったが、注(5)参照。

(2) **中性子**の「発見」はボーテおよびベッカーがガイガー計数管で驚くべき高エネルギーの「γ線」を見出したのにはじまる。*ZS. f. Phys.* 66, S. 289 (1930), *Naturwiss.* 19, S. 753 (1931) I・キュリーとF・ジョリオは ionisation chamber でふたたび「ボーテの線」について実験している。*Compt. Rend.* 193, p.1412 (1931) 194, p. 273 p.708 (1932) これに対して J. Chadwick, *Nature* 129, p. 312 (1932); The existence of a neutron *Proc.*

Roy. Soc. 136, p. 692 (1932) は上記の結果を「γ線」と解すると重大なる理論的困難を生じる所以を指摘し、自身の衝突実験からエネルギーおよび運動量保存則を廃棄しなければγ線とはできないことを証明し、プロトンとほぼ等しき質量の粒子とすれば衝突に関する難点が解決し、さらに大きな貫徹力を説明するために中性と考え、かくてF・ラザフォードが一九二〇年彼の Bakerian Lecture, *Proc. Roy. Soc.* 97, p. 374 (1920) で論じて以来しばしばキャヴェンディシュ研究所で捜し求められた neutron の「hypothesis」を復活せしめたのである。なおここでチャドウィクは中性子はプロトンとエレクトロンの併合物と考えている。

陽電子の「発見」はスコベルツィンが一九二九年 branching track に注意を喚起したのからはじまる。*ZS. f. Phys.* 56 (1929), S. 686 しかし彼はそれを positive〔正〕とはサジェストしなかった。アンダーソンとミリカンは一九三一年に撮影した track に悩まされながら正当な解決を見ずに発表した (*Science*, Dec. 18 (1931))。当時彼らの頭には「proton のみが正電気の基本単位であるという観念が非常に深く根を下ろしていたので、これを拒けるよりはむしろ他のあらゆる解決のための hypothesis をとらしめた」という。positive electron として発表されるまでにはずいぶん慎重な相談と時間を経ている (R. A. Millikan, *Electrons* (+ *and* −), Chap. XIV 特に p. 325—330 による)。これが初めて発表されたのは C. D. Anderson, *Science*. 76, 238 (1932) であるが、学界のいちはやき承認はキャヴェンディシュ研究所のブラケットとオキャリーニによるきわめて模範的な美しい決定的実験 (*Proc. Roy. Soc.* 139, p. 699, 1933) に負うところがある。なおここではじめてディラックの理論に関説されたのである。

以上二つの「発見」の例に徴しても理論にともなわれない実験は今日の原子物理学のごとき精緻なる領域においては何ものをも「発見」しないことが明らかであろう。これはまた今日まだ理論的・実験的討究の対象となっている新発見の**重電子**についてとくに印象的に言われる。ここでは痕跡が他の粒子によるものではないという理論的証明がはなはだ困難な研究を要するのである。

(3) 直接肉眼で対象をとらえる領域の実験と異なり、原子的領域のそれは多少とも**間接的**であり、また**実験条件**や**擾乱的影響**がきわめて大きく響いてくる。適切周到な理論的注意なくしてはそもそも何を実験してきたのかわからぬことになる。もちろんかような事情は前世紀の物理学にも絶無とはいえないであろうが、その程度は比較にならないのである。実験の理論的前提の意義も、かつて新カント派が論じたころとはほとんど別のものにさえなっている。また実験結果を一定の物理学的意味をもつ結果に解釈するには、目で視、耳で聞くのでは足りず、複雑なる理論的討究を要することは前注で述べたとおりである。

(4) W. Heisenberg, *ZS. f. Phys.* 77, S. 1; 78, S. 156; 80. S. 587 (1932), (数物会誌7、一九五頁 (一九三三))

「Über den Bau der Atomkerne」の題目で発表された。これらの研究は、また質量欠損その他のエネルギー論的考察と核安定性とを結びつけて、核の現象論的系統学にも大きな寄与をなした。電子が核内に独立して存在しないという仮定によって系統学的例外も除かれたわけであるが、最も重要なことは、かくて重粒子のみになった原子核へ従来の量子力学を適用する可能性が開かれたことである。しかし軽粒子は絶対的に排除されたわけではなく、ニュートロンとプロトンの交互作用にも Austauschkräfte〔交換力〕の形で重要な役割を演じているので、このモデルにも制限はある。すなわち重粒子と軽粒子との交互作用が重粒子同士の交互作用に比して小さい場合にのみ、dynamisch〔動力学的〕な軽粒子の場が statisch〔静力学的〕な Austauschfeld〔交換場〕で近似されるのであり、この限り量子力学が有効である。C. F. v. Weizsäcker, *Die Atomkerne*, S. 28 (1937)

なおハイゼンベルクはこれらの論文ではニュートロンをプロトンと電子からなると考えているためにニュートロンの「本性」に関してははなはだ不徹底な態度がとられ「ニュートロンの存在が量子力学に矛盾する」といわれている(II, 78 §3, III 80, §3)。またボーアのエネルギー保存則に対する懐疑に影響されてエネルギー論的考察にははなはだ控え目である。

(5) E. Fermi, Versuch einer Theorie der β-Strahlen I, *ZS. f. Phys.* 88, S. 161 (1934)(数物会誌8、三六六頁(一九三四))。この興味ある問題の叙述は科学文献抄(岩波)中の湯川秀樹氏の優れた労作に見られたい。その後、理論的には大きな進歩は発表されていない。ここで一言ボーアが保存則に対して採った態度について注意したいのは、例のB－K－S説の場合は別として、β線の場合については Faraday Lectures (*Journ. Chem. Soc.* 1932, p. 383) やローマの Convegno di Fisica Nucleare, Ottobre 1931—IX での講演を見ると、実験事実の説明が第一の理由であるが、電子の核内存在が量子力学に矛盾するという理論的理由からの類推を保存則ないし量子力学の前提一般のβ線問題への適用可能性の懐疑となっていることは明らかである。しかもまた同じ Faraday Lecture のなかで、電子の核内での消極性 passivity が指摘せられ、それの「mechanical entity〔力学的実在〕」としての存在が疑問視されているのはさすがであり(p. 30)、一方ローマではこの問題は観測による擾乱とは直接関係がないから、ある人人のごとく不確定関係 $\Delta W \Delta t > h$ で説明を企てるのは誤りであるとしている(convegno etc. p. 121)。この最後のことは、今日から考えると、種々の観測の思考実験で量子力学の基礎概念を変革し核問題へ使えるようにしようという予想(付録§2注(1))が無益であることの暗示でもあった。

なおボーアからシャンクランド事件ののちにディラックのこれに関連して発表された量子電磁力学への懐疑を反駁し、電気の不可分割性を考える将来の理論がエネルギーおよび運動量の保存側から real に訣別するのではないかと

疑うなんらの理由もないと公言したのは、人の知るところであろう（*Nature* 138, p. 25 (1936)）。

(6) これはカントの経験の類推とくに「Grundsatz der Beharrlichkeit (der Substanz)〔(物質) 不滅の原則〕」の生き永らえた核心とも言いたい（*K. d. r. V. A.* 182）。またソビエトの批評家の見解は「現代科学の基礎」（白楊社）一七三頁以下に見られる。因果律の場合と同様、エネルギー則も、より一般的な高い見地へ止揚される可能性はもちろん否定できないことを蛇足ながら付け加えたい。

(7) プロトンとニュートロンとのいずれが「実際の素粒子」であるかと問うことは今日ほとんど無意味と見られている。不変性の概念で素粒子を定義することは今日の経験に適合しない。「連続的な状態変化の不能性」のほうが近いという。これはまた素粒子概念の「rein kinematischer Begriff des stationären Zustandes〔定常状態の純運動学的なとらえ方〕」への接近とも解される。Weizsäcker, *Atomkerne* S. 30

(8) これは前注（7）と密接な関係があることで、またフェルミ（5）の理論の出発点にも見られハイゼンベルクによって Zeeman Festschrift. S. 108 でも明瞭に強調された。なお核内における電子の数を云々するなんらの根拠もないことは、上述ボーアの Faraday Lecture (p. 380) でも予見的に強調されたとおりであるが、電子が核中に永存していないことは今日多くの根拠から確定的である。たとえば H. A. Bethe & R. F. Bacher, *Rev. Mod. Phys.* 8 p. 184。また原子外包と原子核における光量子、軽粒子の役割の対照は、同じく上掲祝賀論文中でハイゼンベルクが見事に叙述しているし、ヴァイツゼッカーの書（S. 27 以下）にも興味深く説かれている。これらの Schema 的な対照や分類は核物理学における諸困難を lokalisieren する上に資するところがある（S. 29）。

(9) これはまずエネルギーおよび運動量〔の〕保存則の確保から裏づけられる。以前にL・ランダウがエネルギーの非保存（したがって質量の非保存）は相対性理論により重力の一般法則と矛盾すること（すなわち質量のない空間からの重力の total flux が零にならないこと）で証明した（Tchervonij Gudok. p. 1001. (1932)）（ガモフの本 p. 128 およびヴァイツゼッカーの本 S. 168 による）のは、一つの理論的証明として知られているが、エネルギー保存則が少なくとも統計的に正しければ（これは従来の経験から確かだ）、個別的過程でも正しいという実験的な証拠は核変換における質量差はβ線の平均エネルギーより確実に大きいことで決定的に与えられる。Bethe & Bacher, p. 186; *Kernphysik* (hrg. Bretcher) 中の Cockcroft の講演 (S. 70)、また、綜合報告 E. Nunn May, The conservation of energy and momentum in elementary processsses, *Reports on Progress in Physics* 3 (1936) p. 97 さらに *Royal Society* (London) Mar. 4, 1937 のβ崩壊の討論会の報告 *Nature* 139, p. 477; *Porc. Roy. Soc.* 161, p. 450。

他の方向、すなわち total spin や核統計法の保存等からのニュートリノ弁護論は Bothe & Bacher の§39に力強く叙べられている。ともかくこれらの証明材料が集まったことは、核人工変換、人工放射能、質量測定のごとき実験的技術の進歩に負うている。

(10) 原子外包における輻射と粒子との交互作用が古典的極限とにマクスウェル-ローレンツの理論に移りゆくのに対し、核内交互作用には対応論的アナローゴンがないので困る。フェルミのβ線理論を適用すると重粒子間の Austausch-kraft〔交換力〕は二次の近似ではちょうど電子の自己エネルギーと形式上似た無限大へ diverge〔発散〕する。ヴァイツゼッカーの本 S. 29。 R. Peierls, *Proc. Roy. Soc.* 161. p. 455—6. フェルミの理論から導いたハイゼンベルクまたはマヨラーナの力はあまりに小さい。H. A. Bethe & R. Peierls, International Congress (London, 1934), *Discussion*, p. 66; F. Rassetti, *Nuclear Physics* (1936) p. 200 も参照。(注(17)も参照)

(11) これは初めからわかったことであるが、極端に言えば、かかる理論は実験的に得られるスペクトラムの almost any form に種々の方法で fit させられるほど elastic〔融通可能〕なのである。単に実験を整理するための working hypothesis〔作業仮説〕としては有用であるが、これでは heuristic〔発見法的〕な価値は損ぜられることはなはだしい。R. Peierls, *Nature* 139. p. 477; (Nunn May の紹介による)。

(12) *Proc. Roy. Soc.* 161, p. 455 の Peierls の綜合報告によると、交互作用項が time derivative〔時間微分〕を含むことが、そのはなはだしいものであるが、(10)で述べた例やプロトンの anomalous〔異常〕な magnetic moment〔磁気モーメント〕を正しく出せないことも難点である。二次の近似中の divergence〔発散〕を技巧的に防ぐとローレンツ不変性と矛盾することは、われわれがしばしば他の個所でも出会うところである。交互作用力と重粒子の付加的な mag. moment につきヴァイツゼッカーの§41参照。

(13) いったいニュートリノを「発見する」とはそもそもいかなる意味か、ニュートロンの「発見」も程度上の差ではないか。ともかく種々の Existenzbeweis〔存在の立証〕の困難は当然であろう。Bethe & Becher, p. 188. 198

(14) 高エネルギーの endpoint〔終局点〕を決めることは実験上極端にむずかしいので、付近の曲線から理論で extrapolation〔補外〕をやるほかはないが、あいにくコノピンスキー-ウーレンベックのはこのへんで怪しいのである。J. D. Cockcroft, *Nature* 139, p. 477, *Proc. Roy. Soc.* 161, p. 451 および p. 456 以下のH・O・W・リチャードソンの報告による。ただし実験もまだ確定的ではないらしい。

(15) たとえばニュートリノの質量も電子質量より小で零ではないらしいが不確なスペクトラムの形状や間接的な実験から推論するのだから、曖昧なのも当然である。

(16) ガモフらが提唱し、一般にも支持されている negative proton の存在や宇宙線の問題、とくに最近各所（わが国の仁科研究室でも）で発見を報ぜられる中間質量の陰陽粒子、さてはこれと湯川氏の理論の粒子との関係（17）またβ理論の常数gの物理的意味（ガモフ本 VII §4. Pauli, *Scientia* 59, S. 76）はいまだ十分明らかでないのでここでは割愛する）。

ただP・ヨルダンその他の人々が説く光のニュートリノ説であるが、Positivismus〔実証主義〕を標榜するヨルダンがきわめて形式主義者であることの矛盾はさておき、物理的根拠も乏しいと思われる。またV・フォックが数学的難点を指摘しているそうである。さらにニュートリノとボーアがかつて説いた graviton との関係についても割愛する。

(17) その後、新発見の粒子と湯川氏の理論のそれとの関係がますます注目の的となった。湯川氏自身初めから（一九三四）、氏の想定した粒子が宇宙線中に見出されうる可能性を指摘された。H. Yukawa, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan.* 17, p. 48; (1935) 19, p. 712. (1937)「科学」7、四〇三、四〇六（一九三七）の仁科、湯川両氏の発表参照。

なお湯川氏の理論を展開してβ-スペクトラムと比較しうるようにし、軽原子のプロトン-ニュートロン交換力、プロトンの異常な magnetic moment と対照することは、一面において新粒子の間接的証明でもあるから、すでに進行中とは推察するが、とくに希望したい。湯川氏のボース統計法にしたがう粒子がただちにW・パウリおよびヴァイスコップの skalar〔スカラー〕な相対論的波動方程式から出る粒子と同一視できるか疑問であり、E・C・G・シュトゥッケルベルクの大がかりな物質場理論に希望をつなぐことはできないにしても、新粒子の発見によってますます錯綜するかに見える素粒子が、かえってじつは高い統一への一歩を進める結果になるかも知れない。

(18) たとえば遅い中性子の吸収の問題等で行き詰った。なおこの一段は N. Bohr, *Nature* 137, p. 344—348, N. Bohr & F. Kalcker, On the transmutation of atomic nuelei etc. I, *Danske Videnskabernes Selskab, Math. Fys. Med.* XIV (1937): *Science* 86, p. 161 (1937) およびボーア氏の東京における講演（一九三七）を基にし、Bethe, *Nuclear Physics, B. Rev. Mod. Phys.* 9. p. 715 § 51 を主として参照した。

(19) 前注の Bohr & Kalcker 参照。

(20) 全体とその構成部分とが、かくも緊密な一即多、多即一ともいうべき融合状態にある場合は、従来物理学の方法そのものの本質的な制限により取扱い不可能な領域と見られていた。したがってこの問題の解決が偉大なる成果をともなうことは期して待つべきものがある。もちろん、ハイゼンベルクも強調したごとく、一領域で得られた法則をそのまま他の今日いまだ物理学に属しない領域へ適用してそれを究め尽しうると考えるのは警戒を要するが、それにもか

かわらず「全体的なるもの」への迫進が有機体問題に暗示するところ多いのは否定できない。

(21) 今日の状勢とかつてのそれとの比較は P. Jordan, A. *QT.* S. 245; v. Weizsäcker, *Atomkerne*, S. 30。

(22) いかにもディラックの「空孔」理論では素朴な意味で物質が輻射に、輻射が物質に「成り変わる」のではない。物質は異なるエネルギー状態に移るにすぎない。しかしながら今日、スコラ的な絶対的対立としての実体と様相、物質と運動の区別を固執することは、しだいに困難となりつつあることをここに見ることができよう。ニュートンは彼の 'Opticks' のなかで物体の光へ、光の物体への変化は「transmutation〔変換〕」を好む自然のコースにはなはだ適合していると説いた (Book III Part II, Quest 30) がこれは彼の光粒子説からは考えやすいところであったろう。

(23) これは光量子と電子対の生成、消滅の virtual〔仮想の〕な可能性から起こるのであって、光は電磁場通過の際、場の作用のため真空が1と異なる電媒常数を有するかのごとく影響される。これらの問題はディラック、ハイゼンベルク、H・オイラー、B・コッケルら（一九三四―三五）に論じられた。なお v. Weisskopf, Über die Electrodynamik des Vakuums u. s. w. *Danske Videnskabernes Selskab. Math. Fys. Med.* XIV 6 (1936) やチューリヒの人々に論ぜられた。また、P. Jordan, A. *QT.* S. 259 参照。

(24) かくて一般に物質粒子の数は絶対的意味を持たなくなったと言える。P・ヨルダンはこれを、相対論的領域では量子力学的単体問題はあり得ずと言表した。*A. QT. S.* S. 214

§4　他の学問領域との交渉[1]

（i）**生物学および生理学との交渉**　古典物理学に深く根を下ろす機械論的表象に対蹠的なものとして、以前から、生命ある有機体の機能が指摘せられてきた。原子物理学が同じく古典的記述方法の到達しえない領域にその特有の研究分野を有することは、微細なる物質過程が有機体の機能に重要な役割を演じていることと思い合わせて、無機的物質と有機体とのあいだの深淵は原子的過程において、たとえ架橋されるとは言いがたいにしても、なんらかの示唆を感得しうるのではあるまいかと予感される。[2]原子的過程が粗視的・現象論的な熱力学などよりもさらに深く生命過程に触れていることは、植物の同化作用や動物の呼吸栄養の作用が個別的原子過程に基づく点からも言いうるであろう。[3]それにもかかわらず、原子過程の有機体の機能への本質的な重要性を認識するだけでは、いまだ生物学的現象の固有のもの、いわゆる「全体的なるもの」の特徴を解明する手がかりは得られない。[4]かくて一部の生物学者は生命現象の物理学的研究にきわめて懐疑的であるが、一方に機械論的偏狭をしりぞける[5]われわれは、他方に Vitalismus〔生気論〕の非科学性をも排撃せねばならぬ。[6]このディレンマの真の解明には、物理学と生物学との実験研究の状況が根本的に異なった特性をも

つ事実を認識しなければならぬ。有機体を構成している原子の動静を物理的実験の可能なかぎり追究するならば、これは生命を失わせる結果となろう。逆に、有機体を生かしておくためにはその研究の物理的条件にはつねに或る程度の不確実さを許さねばならない。[7] 量子力学における原子の安定性とその構成部分の古典的記述との相反的な補足関係のアナローゴンがここにも現われる。さらに、物理学においては（量子力学の場合にも）研究対象は原則上与えられた体系であるのに対し、生物の生命と分離しえないかの新陳代謝のために、事実上、厳密に言ってどの原子がその生きた組織に属しているかを判定することができない。[8] かくて生命の存在は、あたかも原子物理学における作用量子のそれのごとく、生物学にとってひとつの「Elementartatsache〔要素的事実〕」と見なすべきものであろう。[9] ボーアも強調するごとく、かかる事態は生物学における物理的・化学的研究方法への懐疑を意味しない。原子物理学の研究が、古典的に記述される実験装置で行われるのと同様の事柄である。

（ii）心理学その他との交渉　以上のごとき物理学と生物学ないし生理学との研究方法上の補足関係は、生理学と心理学との交渉においてさらに高度の形態をとって現われる。[10] 心理的過程の生理学的追究がもとの意識内容を変化せしめる事情は、まったく前の場合と並行な補足関係であるが、これはいわゆる精神物理的並行論の新しき出発点として解釈さるべきものである。ここに注意しなければならないのは、原子的過程の研究に因果的記述を適用することが制限を受けたことから、これが物質的過程への直接的な精神の働きかけに可能性を開くものと考えてはならないということである。たとえば、単に確率的に決定される原子過程はその不決定的な間隙が有機体内では意志によっ[1]

て選択統御せられると考えると、[11] これは精神物理学的並行に対して不合理をきたすから、ボーア[12]とともに断乎としてかかる見解をしりぞけねばならない。意志自由の感情は、その物質的な並行現象を物理的・化学的・生理学的追究とは相反的な補足関係にある有機体の機能に求むべき意識生活特有のものと考えるべきであり、さらに、心的体験の**自己観察**においては主観と客観とが原理的に分離不可能であるため、因果律適用の前提が失なわれ、ここに意志や感情の固有の領域が潜んでいる。[13] これは分析的な意識に対する補足関係と解せられるから毫末も神秘主義を許容するものではない。

以上のごとき認識が、さらに広汎な精神科学、社会科学の領域[14]における研究へも多くの示唆を与えることは疑いを入れない。かくしてわれわれは各研究領域の偏見を打破し、科学の統一への前進を期しうるであろう。ただ注意すべきは、それらの領域はいずれも固有の特殊性を有するものであるから、これを無視したあまりにも図式的な補足関係の「応用」は、かえって補足関係の真の精神そのものによって反駁されるということである。われわれの関心は、かかる他領域への展望によって物理学における事態そのものの反省を深化するところに、まず集中されなければならない。[15]

（1） 本節は大体においてボーアの思想をそのまま紹介した。ボーアは Wirkungsquantun und Naturbeschreibung *Naturwiss.* 17, S. 485 (1929), Die Atomtheorie und die Prinzipien der Naturbeschreibung. (1929), *Naturwiss.* 18, S. 77 (1930)（これ等は今日、ボーアの *Atomtheorie u. Naturbeschr.* 中に収められている。この書の序文にも以下の問題に触れている）等で生物学心理学の問題に触れたが Licht und Leben (1932) *Naturwiss.* 21, S. 245 (1933) ではこれを主題として論じ、Kausalität und Komplementarität, *Erkenntnis* 6, S. 293 (1936)（富山小太郎先輩の原著御貸与および訳者鶴田氏の御教示を謝す）や東京の講演（一九三七）で同様主旨の事を繰返し説いておられる。P・ヨルダンはややこれと違った方向へ論及した。 *Naturwiss.* 20, S. 815 (1932)

「科学」3、9および *Anschauliche Quantentheorie* (1936) Kap. V 参照。ヨルダンの「増幅装置理論」(注(11) 参照) が熱力学の前提たる Unordungshypothese〔無秩序仮説〕と矛盾することは T. Sexl, *Naturwiss.* 24, S. 77 (1936)。

(2) これはまず両領域のアナロジーから感じられる。生命は「時計仕掛け」でないとともにまた「火」という古き比喩でも表しがたい安定性を有する点で原子の安定性にアナロジーを持つ。

(3) クロロフィルやヘモグロビンのごとき複雑な化合物の分子構造論的特質と同化作用、呼吸作用との関連は確実であろうが、ヨルダンの臆断に対しては生物学者の側からの反対が少なくない。ただここに生物学者等に特に理解を望むのは**化学**は今日原則的には量子論の応用科学に帰しているという事実である。*Handbuch der Physik*, 2te Aufl. XXIV の第二巻の化学への量子論の応用を見るものは**分子構造論**を通じていかに種々の物質の特殊的性質が一般的原理から理解されるかに驚異を感じるであろう。マックス・ハルトマンのごとき著名の学者に一定の分子変化はマクロ物理的だというような議論が見られるので蛇足する所以である。Vgl. *Bel. Ber.* (1937) S. 50.

(4) Licht und Leben。この点はP・ヨルダンの所論は充分明瞭でなく、いわば「存在的」(ontisch) な立場から脱却していないのでM・ハルトマンあたりから、「Die Biologie ist keine angewante Physik und Chemie……〔生物学は応用物理学や応用化学ではない〕」等と反対を招くのである。特に注意を要する点と思う。teleologisch〔目的論的〕な見方も Metaphysik〔形而上学〕ではなしに方法的なものとしてある範囲内では適用を許せると思う(ボーア)。

(5) いまだ相当多数の生物学者がマクロな物理・化学のみでやれるように考えているのは、ヨルダンへの多数の反駁文を見ると想像される。

(6) 生きた有機体の作用を何処まで分析して行っても無機的物質の Verhalten〔ふるまい〕から偏(そ)れた生命力というようなものを見出せるとは期待しない。「われわれは自然は同一の条件の下では同一の合法則性を示すと考える点でニュートンと一致している」というボーアの真意も神秘主義を警戒するにある。

(7) この点で有機体を許容しなければならぬきわめてわずかの自由といえども、その最後の Geheimnis〔秘密〕をわれわれから隠(かく)すに足るのではあるまいか(ボーア)。

(8) 量子力学とは原子的対象と粗視的観測器械との間に境界を画したが、生物学の場合はこの wohldefinierte Grenze〔はっきりと定義された境界〕もなくなる。Licht u. Leben, S. 249.

(9) ボーアの irrational〔不合理的〕と言う形容は日本語に訳すと誤解を招き易いが、学問上の Postulate〔根本要請〕の意味に解すべきである。

(10) この場合にも比較的皮相なアナロジー（たとえば連想的思惟の絶えざる変動と人格の統一との対立が重畳原理に基づく波動の進行と物質粒子の個別性の対立と比較される）から出発して、感情や意志生活と直観的表象との対立等を経て深化する。

(11) P・ヨルダンのいわゆる有機体の Kontrolmechanismus〔制御機構〕や Verstärkertheorie〔増幅器理論〕（増幅管の作用のごとく都合のよい刺戟のみを選択して拡大するという仮説）にはかかる誤解への危険が多分に潜んでいる。

(12) Licht u. Leben, S. 249. これは英米に多い卑俗な神秘主義的物理解説者への警告である。

(13) ここでは「意志自由の感情は単に主観的か、それとも客観的に基礎づけられているか」という問いは事態に対してあまりに粗雑である。これ等のアンチノミーを明瞭に解決すべく新しい「純粋理性」批判ならぬ科学的研究法の基礎づけが Komplementärität〔相反補足性〕の思想の展開として要求される所以である。意志自由と主客の分離可能性の関係については、M・プランクも説いている。

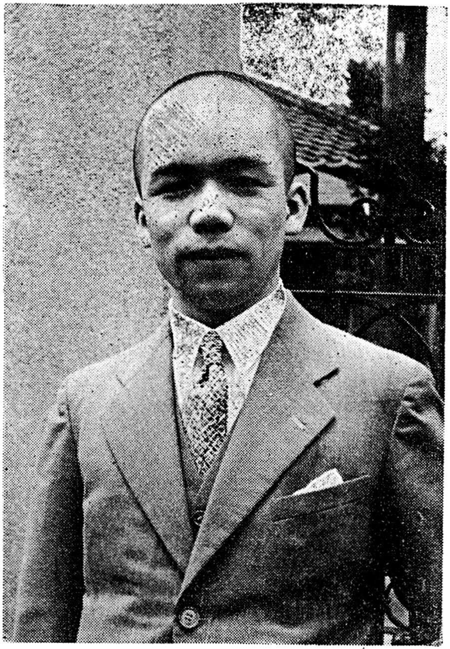
自己観測の相反補足性の例としては、憤怒のごとき強烈な感情がこれの分析によって減衰消滅するごときは適切であろう（ボーア、ヨルダン）。一般に、思想・感情・本能・理性等の概念を種々の心的体験の叙述に用いるのは自己観察の特異性に条件づけられた補足関係の存在を示すものであるという（ボーア）。

(14) ボーア氏は、動物の飼育等のまったく異なる実験条件から得られた eugenics〔人種改良学〕の知識を社会条件を無視して民族浄化運動に適用せんとする政策が所期とはまったく異なる結果を生ずる事あるべきを警告された。他の「政策」についてもきわめて意味深長であると感じたものは少なくあるまい。「Deutsche Physik〔ドイツ物理学〕」の理論物理学への反対についてはハイゼンベルクの反駁がある（*Wandlungen*, S. 16）。

(15) C・ダーウィンがR・マルサスの人口論から彼の有名な学説の暗示を得たように、核物理学は、その古典物理学と生物学の中間的ともいうべき位置によって、生物学から学びうるところがあろう。否、少くとも新しい法則性を了解し易くし、したがって捉え易くすることは確実である。

〔1〕原著では「不決定的の」。

解題および天野清略年譜



天野清氏遺影　昭和13年6月、麻布の天野家菩提寺徳正寺前にて。

解題

天野清の公人としての活動は、昭和七年、天野が東京帝大の物理学科を卒業して九州帝大工学部の助手になったときに始まり、昭和二十年四月十四日、天野の不慮の戦災死によって突然に閉じられた。

僅か十年ほどの公的活動期間の天野の業績がどれほど多くの方面にわたったか――それは略年譜によってたやすくうかがい知ることができるであろう。そして同時に、天野の多方面の関心事のなかの、もっとも力強くまたひとたびも絶えることのなかった底流が何であったかも、略年譜はあらわに教えてくれる。すなわち、天野が初めて世に問うた本格的な労作『量子論解釈の変遷と其文献』(『日本数学物理学会誌』に昭和十一年から十二年にかけて三回連載された総合報告。以下、〈解釈〉と略記)を輝かしい起点とし、天野の没後に発見・刊行され、そして今ここに復刊される『量子力学史』(以下、〈史〉と略記)を悲劇的な終点とする「量子論の――ことにその認識論的な――発展の研究」[1]こそは、天野の――不幸にして長くはなかった――生涯の最大の関心事だったのである。

〈史〉の復刊にあたり、お勧めにしたがってここに添えようとする解題は、いわば「天野・量子力学史の――ことにその文献学的な――発展の研究」を意図するものであるが、「解題者の非才に加えて、事柄の困難なためにいまだその輪郭を得たにすぎない」[1]。

〔1〕 天野『熱輻射論と量子論の起原』「はしがき」、大日本出版株式会社・昭和十八年。

1 『量子力学史』のソース

東京高校理科の学生であった頃の天野は、まさしく哲学青年のひとりであったらしい。それも、よく言われるようなはしか程度のものではなく、かなり重症だったようである。「同姓のゆえもあってか、天野貞祐訳のカント著作を原著と照合し誤訳を指摘するなど、大変な勉強ぶりだった[2]」、「大学入試にいちど失敗したのは、哲学に凝りすぎたためかもしれない[3]」などの言伝えだけでなく、たぶんその頃に書かれたと思われる部厚い宗教論の遺稿が、天野の哲学青年ぶりの証拠を残している。

理学部で物理を学んでいる間に天野は、理学部同窓会の雑誌のために、寄稿もし、寺田寅彦のところへ原稿をもらいに行ったりもしたそうだが、ここに書きとめておかなければならないのは、彼が単独で、あるいは一説によればクラスメートとともにまとめた『量子力学文献集』のことである。この大部なガリ版刷りの本[4]が後年の〈解釈〉や〈史〉のソースブックの役をしたと考えるのは、ごく自然のことであろう。そして、天野の大学在学期である昭和四―七年を西暦一九二九―三二年と読みかえて、その頃の量子力学そのものの状況を、たとえば本書の§12から§15あたりに引用されている欧州の論文や著書の年号と見くらべながら脳裏に描いてみるならば、この文献集がどれほどなまなましいものであったかが想像されるであろう。当時の日本語文献は、『物理学文献抄』（第一輯、物理学輪講会同人編、岩波書店・昭和二年八月）と坂井卓三「量子論」（岩波講座『物理学及び化学』、昭和五年十二月）とで代表されようが、前者は本書§11の前半まで、後者は本書§13の一部分までにほぼ相当する、当時最新の学説をとりあえず紹介したものであった。

天野の遺品の中に、昭和七年四月付で印刷された葉書がある。天野が就職挨拶の意味で発送したものの残りであって、「春陽之候……小生今回東大を卒業致し……九州帝国大学工学部数学物理教室に勤務致すことと相成

りましたので取敢えず　御報申し上げ……　なお急に赴任致すこととなり……」とある。

九大では桑木彧雄（あやお）教授が科学哲学・科学史学の方面でのユニークな存在として知られていた。九州時代の天野と桑木との関係を直接に示す文献としては、桑木『アインシュタイン伝』（『偉人伝全集』第十八巻、改造社・昭和九年九月）の巻末「アインシュタイン氏著述目録」への脚注に「この目録編纂には理学士日下部智、同天野清、二氏を煩わした」という記述が見られるだけであるが、この目録が〈史〉のソースの意味をもったこともまた自明である。

ところで遺品の葉書であるが、その裏（本来なら宛先を書くはずの場所）に、天野自筆のメモが書きこまれている。余った葉書の裏をメモカードとして利用したその一枚が残ったわけだが、そのメモを本書の校訂ルールに従って書きうつすと、

直観的 - 古典的概念の不可欠性

ハイゼンベルク　本　一―二ページ

ボーア

MeBinstrumente〔測定器械〕における　フランク二六ページ

Schr.　一、概念自身が悪い　　モデル

二、プロクルスチー

〔2〕湯浅光朝氏の談話。

〔3〕同前。ただし「天野さん……のような秀才が初めの大学入試で落ちたのだから、試験制度などはやめてしまうに限る」という意見もある（伏見〔4〕参照）。

〔4〕伏見康治、『自然』第一八巻第五号（一九六三年）、三二ページ。

となり、本書とくに§19の重要な主張の構想がこのメモに書き散らされていることがわかる。「Schr.」はシュレーディンガー、「プロクルスチー」は本書二四七ページのプロクルステス、「ハイゼンベルク〔の〕本」とは本書の記号では *P. QT.* と記されているもの、「フランク」とはウィーン学派の **Ph. Frank** のことである。

この葉書の裏のメモが九州時代の天野の手で書かれたものかどうかは確言できないが、いずれにしても〈史〉の素材はこのようにして集積され分析され続けたのであった。

葉書の裏にかぎらず、さまざまな様式の紙片に書きたくわえられたメモが遺品の中に見出されるが、それらとともに残されているノート類のうちでとくに印象的なのは、欧文の雑誌論文（ときには書物の一部ないし全巻）の丹念な筆写記録である。アインシュタインの光量子論の論文（一九〇五年）の全写、ハントブーフの中のパウリの論文（一九二六年）の主要部の筆写などが、その典型的な例であるが、コピー機器の普及した今日ではとうてい真似のできない丹念さがそこに認められる。天野の実生活および学問上の関心の推移から判断すれば、量子論の学説史的研究のためのこの種の蓄積は、主として彼の九州時代になされ、すでに厖大な分量に達していたと思われる。

昭和十年四月、天野は、九州時代に得た伴侶と、貨車一台分にも及ぶ書物とともに、東京へ帰った。

2　環境的な現実の諸条件

昭和十年二月十二日付の、渡辺襄[5]から桑木彧雄への手紙を抄録してみよう。「桑木先生座下……さて天野君の件について御配慮くだすって（ママ）ありがとう存じます。数日前寺沢君[6]から履歴書を頂きました。……御当人は成績人物ともによろしき由で喜んでおります。背の小さい（ママ）は私の所では一向にかまいません。ただ仕事が「アカデミック」に考えて低級である事で当人がながく満足さるるかどー（ママ）かと思われますが仕事を初め（ママ）れば案外興味

のわく事もありまた周囲の事情でいやになる事もありこれは未来の問題として転任のように話を進めて見ましょう……」

一読すればごく平凡な人事連絡状であり、実際にはこの手紙のひと月半ほどのちに転任が実現され、天野は、新しい職場、商工省中央度量衡検定所（通商産業省計量研究所の旧称）において仕事を始め、そこでの本務に対し、案外どころではなく非常な興味をもって精励し（略年譜の「実践的」の欄を参照）、また確かに、周囲の事情でいやになったこともあったわけだが、この新しい環境が〈史〉の仕事にどう影響したかは、天野自身が次のように書き残している。[1]

「……編者が量子論の——ことにその認識論的な——発展の研究に着手したのはすでに十年も以前のことであった。しかし研究の進むにつれ、純理論的な連関は、科学の発展のきわめて狭い一面にすぎないこと、環境的な現実の諸条件をきわめることなくしては、科学史はついに文献年表か物語の域を脱しないことを痛感しなければならなかった。……

ただ量子論の起原の問題……は、少くとも熱輻射論史に関連するかぎり、編者は比較的恵まれた事情の下で研究することができた。

それは公務として輻射による高温計の研究に従事したために、たとえば、ウィーンの式によって、黒体輻射の測定などを日常に実験する機会が多かったこと、また編者の勤務した商工省度量衡検定所が、量子論の発端

〔5〕 当時（昭和八—二十一年）の中央度量衡検定所長。カドミウム原子の線スペクトル波長の精密測定や光波干渉による基線測定の研究で国際的な声価を得た。昭和十三年、メンデンホール記念賞を受けた。追悼文、『計測と制御』第九巻第五号（一九七〇年）巻頭。

〔6〕 寺沢寛一・東大理学部（物理）教授。追悼文、『科学』第三九巻第五号（一九六九年）、二七七ページ。

となった熱輻射の重要な実験が行われたベルリンの国立物理工学研究所の一部と類似した目的をもっているために、そこの事情を知る上に便宜があったことである。……」

アインシュタインが Physiker und Erkenntnistheoretiker（物理学者にして認識論学者）と呼んだ[7]桑木のもとから、すぐれた実験物理学者である渡辺のもとへの天野の転任は、〈史〉のための蓄積の対象を、いちじるしく拡大させた。たとえば本書§3で活用されている雑誌 *Zeitschrift für Instrumentenkunde*（今日の *Meßtechnik*）が、そのもっとも顕著な例である。その頃のものと思われるメモカードには、検定所での実践的な仕事のための備忘と物理学史研究のための備忘とが、まとめて書かれたりしている。公務の内容の変化と並んで東京という地理的条件が、天野の文献渉猟と交際の範囲の拡張を可能にした。ここでいう範囲を、無原則的に列挙すれば、東大、理研、電気試験所（電子技術総合研究所の旧称）、日本学術振興会（製鋼第一九委員会）、計測学会（日本度量衡協会傘下）、岩波書店の『科学』などが上位にランクされる。労作の発表も、堰を切ったように活発になった。

とはいえ、『科学』に寄せた作品は、寄書「フォトン散乱の実験と因果性問題」、抜粋「ハイゼンベルク、現代物理学の原理的諸問題[8]」、同「ボーア、自然哲学と人間文化[9]」、書評「プランク、Determinismus oder Indeterminismus（決定論か非決定論か）」などであって、ひと口に言えば九大の桑木スクール時代の天野の関心事から遠く隔たったものではない。そして、これらの仕事とも関連づけられながら、われわれのいう〈解釈〉の力作が順次に公開された。

ここで〈解釈〉のI（昭和十一年十二月）の緒言を引用しておく。「周知のごとく、現在、原子物理学はその発展の一つの段階から他の段階への推移の過程にあるが、ここでは、量子力学に対しボーア、ハイゼンベルク

らが与えた解釈を契機として起った諸論争を中心に、量子論が今日までに閲みした認識論的問題の変遷を概観し、その重要な文献を紹介して見たい。物理学そのものの立場から必要な問題に限ったので、文献もおのずから物理学者の業績に限られることになった。もとより論じ尽された事柄も多く、すでに時期に遅れた感すらあるが、ただ、近く予想される変革のために基礎概念の再検討が要求される折柄、学者の研究の一資料ともなれば幸いである」

この緒言をわれわれの立場で解釈しなおせば、天野は、哲学青年時代いらい蓄えてきた学殖の中から「物理学そのものの立場から必要な問題」を抽出し、現代の物理学の「基礎概念の再検討」のための資料を構成したのだと見ることができる。

〈解釈〉の連載中には、阪大の伏見康治からG・バーコフ、J・v・ノイマン連名の「量子力学の論理」[10]の内容の詳報[11]が天野のもとに寄せられ、〈解釈〉のIIの補強に役立ったということもあった。〈解釈〉のIIIは本書の付録に再録されているが、三回にわたった連載の全体への結語は、次のようなものであった。「われわれは以上においてきわめて疎略ながら量子論の解釈の発展を叙述してきた。なるべく外部的な歪曲を排して事

〔7〕矢島祐利、『科学史研究』第十号（復刊第一号）（一九四九年）、一九ページ。
〔8〕W. Heisenberg: *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft, Erweiterte Aufl.*, (1936)
〔9〕N. Bohr: *Nature*, 143(1939) p. 268 この作品は後に『世界大思想全集』第二期第三十五巻（河出書房新社・一九六〇年）に収録された。
〔10〕G. Birkhoff and J. von Neumann: The logics of quantum mechanics, *Annals of Mathematics*, 37 (1936), p. 823
〔11〕伏見の手稿と書簡が天野の遺品の中にある。当節ならコピーを送るところであろうが、伏見も丹念に内容紹介を書いた。

態そのものに語らしめることを理想としたつもりであるが、これがどの程度まで実現されたかは危惧の念をもって顧みざるをえない。このことを度外視しても物理学の内部に限ったかかる方法が、事態の全面的把握に欠けるところがあるのは今日すでに明かである。すなわちこの種の研究は特殊科学の制約を超えてさらに広汎にして深刻な哲学的基礎づけを要するとともに、とくに斯学発展の現実的物質的な地盤の認識によって真の客観性を獲得せねばならぬ。この実現は後日の課題として残されなければならない。（終）」

　このようにして〈解釈〉の緒言と結語とを読み比べてみると、天野の本来の問題意識とここに公けにされた労作における叙述態度との間に少なからぬ離反のあったことが知られる。その離反が『日本数学物理学会誌』という特殊科学の学会誌という制約から生まれたことは自明であろう。ただしその制約が学会（の編集会）の側から課せられたのか、あるいは天野の側でみずから課したのかは、即断できない。[12]

3　『量子論解釈……』をめぐる交友と論究

〈解釈〉の熱心な読者の中には坂田昌一[13]、武谷三男らが含まれていた。本書の選集版への序で武谷は次のように書いている。「私が〔天野〕氏の存在を知ったのは昭和十一年から三回にわたって日本数〔学〕物〔理〕学会誌に『量子論解釈の変遷と其文献』という論文が連載されてからです。この論文は博引傍証まことに緻密なもので、当時私も京都の『世界文化』誌上に量子力学の解釈について論じていましたので、ただちにこれを送り文通を初(ママ)めました。[14]……」

〈解釈〉に対する反響は活字の上ではあまり多くなかったようであるが、武谷の場合の「ただちに文通」をはじめとして、天野を相手とする量子論解釈討論はこの後とみに広くまた深くなった。

「毎晩のようにどこかで議論していたような気がする」という追憶談[15]や、「天野君は、役所がひけてから、大

題者はたびたび耳にした。

きなかばんにどっさり文献をつめこんで、わたしの住いにやってきては、夜ふけまで議論していったものだ」という回顧談[16]が、天野の死後十年、二十年を経たのちにもきのうのことのように印象ぶかく語られるのを、解題者はたびたび耳にした。

そのようなサークルでの天野が周囲の人の耳目にどのような印象を与えたか――「だれよりもかれ〔天野〕なしにこの国における科学史研究の前進は困難である」[17]として、天野に全幅の信頼を寄せていた菅井準一は、本書の選集版の「序」に、真情あふれる一文を加えている。[17]

「彼はいつも言葉のこけおどしやものものしい粉飾をかなぐりすてる用意を忘れぬすぐれた科学人であった。どんな場合にも彼の言葉は実践の裏打ちがあったのである。彼は先輩や同僚に対して真実を傾けつくして交わり、なごやかなふん囲気の中で、それらの人たちのそれぞれの立場を理解し、しかも友情におぼれることなく、柔軟性のある、ユーモアに富んだきびしい批判を与えるとともに、その誤謬を自らに意識させるように心を配った、まれに見る友情の持主でもあった。彼は生活実践のただ中にあってつねに科学の精神を見失わなかったのである」

このようなサークルの話題は、のちには日本科学史学会の設立（昭和十六年四月）や運営のことにも及んだは

〔12〕世上では「学会側から課せられた」と見る向きが多いようであるが、天野には、与えられた土俵の枠を踏み越すまいと気を配る義理固さがかなり強く備わっていたから、「みずから課した」可能性も多い。
〔13〕坂田『物理学と方法』（白東書館・昭和二十二年）、二六ページ。
〔14〕本書・選集版、序、Ⅶ―Ⅹページ。
〔15〕富山小太郎氏の談話（昭和四十年ごろ）。
〔16〕菅井準一氏の談話。
〔17〕本書・選集版、序、Ⅰページ。

ずであるが、ここで着目している量子論解釈をめぐる討論の一断面については、天野自筆のリアルな記録があるので、原文のまま採録しておくことにする。一見すると日記の一部のようだが、遺品中これ以外に日記風のものはなく、これも一枚の原稿紙に書かれているので、とくに印象的だったその日のことを日記の文体で独立に書きとめたものと解される。文中の「ボーアの……」と日付との関係は、略年譜所載事項ともいちおうは対応している。

「昭和十四年五月五日（金）

帰りに岩波へ寄り、ボーアの『自然哲学と人間文化』の訳を渡した。

富山、菅井氏と話し、三木清氏に紹介され、石原純氏を前に置いて富山氏と『量子論に於ける古典的なるもの』に就て論ず。

富山氏『古典的なるものを要せず一切を（測定器械を含めて）量子論的に記述し得』『固有値等は postulate して了へばよい（恐らく 数学的形式が実験のどれに当るかを postulate して了へばよいの意）』『若し人間が一個の原子でも測定出来る』『Observer は対象の外に立つ』『粗視的に翻訳する必要なし』…………

之でいよいよ自分は自信をかためた」

解題者は、何よりもまず、この夜の会合の顔ぶれが大物ぞろいであることに一驚し、また、いわゆる岩波文化人集団といったことを連想するのであるが、この記録のひとつのおもしろさは、そこに富山の説ばかりがしるされていて、自分（天野）がどのような意味で「自信をかためた」のかはまったく記されていない、というところにある。この記録ぶりは、のちに引用する「〔天野〕氏は、どちらかといえば、人をして語らしめて自己の信念を確めていたとでもいわれようか」（富山）、「しかし〔天野〕氏は……あらゆるものを認めて……」（武谷）と、みごとに呼応しているのである。

「あらゆるものを認めて……」という態度は、天野が九大時代いらい接した桑木の学風——矢島の追憶的批評[7]によれば「旗幟鮮明でなく……博識に対応すべき断定力を欠く」——に通ずるかのようであるが、じつは決してそうではなかった。天野が、この解題に略述されているような道程を経て、着々とたくわえ、黙々と考えきわめてきた末に、「自信をかためた」ところの所説——それが、ほかならぬ本書に、とくにその§16—§20に、まことに旗幟鮮明に詳述されているのである。

　富山の見解は、天野の日記の日付と相前後して発表され[18]、十七年後の著書[19]において、「一貫した立場から」、「各自の立場を露呈する程度に、徹底的に」という自認（同書の「序」、これもまた自信と読みかえられよう）のもとに、ふたたび詳述された。

〈解釈〉いらいの文通相手だった武谷もまた旗幟鮮明な論客として天野の前に現われた。

「氏と最初に会ったのは昭和十六年の初め富山小太郎氏に紹介され、一夕大いに議論をたたかわし、私は氏のボーアの相補性原理の評価を強く攻撃したものでした。……当時まで私の見るところでは天野氏はハイデッガー流の近代存在論的な立場にあるように見うけられました。しかし氏はそういった意味での立場を決してはっきりせず、着実にあらゆるものから学び、あらゆるものを認めてその中から何かよいものをひき出そうとするかのようでありました[14]」

　天野に対するハイデッガーの影響は、たとえば本書の一〇〇ページ、対応原理を論ずるくだりで、「特定な現象の法則を与える存在的な命題」と「古典的と量子的の両存在領域の関係を規定する存在論的な原理」とを区別しているところに認められる。すなわち、存在的 ontisch な命題と存在論的 ontologisch な原理とを明

〔18〕富山「量子論における古典的なるもの」『科学』第九巻第四号（一九三九年）、一五六ページ。

〔19〕富山『現代物理学の論理』、岩波書店・一九五六年。

らかに区別しているのであって、この点で天野は、哲学者田辺元の解釈を正しいとしている。

武谷の所説がいわゆる三段階説として戦後の科学・技術思想に強い影響を与えるものに発展したことは、よく知られているところであろう。この論陣においては、田辺哲学は徹底的に批判された。

物理学の真の基礎にかかわるこのような哲学的議論が、まさに各人各様の立場で、しかも昭和十四—十六年というあの重苦しさのつのり続けた時代に、これほどにまで深められたということ——解題者はわずかにその片鱗を引用紹介しうるにすぎないのだが[20]——そのことをここに誇りをもって力説しておきたいと思う。それにつけても、富山、武谷の著書に比して天野の本書が久しく「幻の名著」の運命のもとに置かれてきたのは、残念なことであった。本書の復刊によって、三人の個性ゆたかな先人の業績のそれぞれの意義が再検討され、論議がさらに深められてゆくことこそ、解題者の最大の望みであり喜びである。

4 『量子力学史』の成立過程

戦時下の日本に、一種の科学史ブームがあったといわれる。その頃の「一見、科学史風」の出版物の中には、時代に迎合し俗流に陥ったものも少なくなかったらしいが、日本科学史学会を中心とする活動は、多くの困難に遭遇しながらも、可能なかぎりの純粋に学問的な志向を崩さなかったといえよう。天野は学会の幹事としての実務に時間と労力を割きながら、もちろん度量衡検定所での公務や、さらに昭和十九年四月から専任となった東京工業大学助教授としての仕事にも精励しつつ、日本度量衡史などの新領域においてもすぐれた論文を発表した（略年譜参照）。

一方、学会と直接の関係はなかったが、ほぼ同様な顔ぶれのもとに『科学古典叢書』が企画され、天野はここでも、余人をもっては代えがたい仕事をした。すなわち同叢書の物理篇の編集幹事として菅井、渡辺慧とと

もにプランクに参画し、みずから三分冊の訳編を担当することとし、そのうちの『ウィーン、プランク論文集——熱輻射論と量子論の起原』を完成して、叢書全体のトップを飾ったのである。

この仕事がどれほど高い評価のもとに世に受け入れられたかを証明する材料もまた解題者の身辺にかなり集積されているのであるが、その紹介はここでは断念し、〈史〉の成立過程を知るために必要な事実だけを見てゆくことにする。

ここで、解題者がまとめた次表を参照していただきたい。そこには、〈解釈〉をIとし、『熱輻射論と……』および不幸にして予告だけに終った同叢書中の天野担当の二分冊をIIとし、そして本書をIIIとして、三者の内容の対応関係が示されている。なお表中のXは、解題者が三者を読みくらべ、またさまざまな関連情報を総合して、〈史〉の各部分がどのようにして成立し、どのような段階で選集版に収録されたかを推定したものである。原著者の真意を問うすべがすでに久しい以前に絶たれてしまったからには、このような推定は失礼ともなり誤解を招くものともなりかねないが、ここでも天野の言葉を借りて解題者の真意を明らかにしておきたい——「これはもとよりすぐれた先学の功績をいささかなりとも減ずる意図をもってされたことではない。……およそ科学的な科学史の当然の義務であると信じる。ただ編者〔解題者〕の浅学にしてこれをあえてした非礼については、……偉大なる先輩の寛恕を乞うほかはない[1]」。

〔20〕 武谷『弁証法の諸問題』、霞書房・昭和二十一年。『量子力学の形成と論理I』、銀座出版社・昭和二十三年をはじめとする多数の著作。

I	『量子論解釈の変遷と其文献』（総合報告）『日本数学物理学会誌』昭和十一—十二年（一九三六—三七）	緒言 §1 量子論の発端
II	『熱輻射論と起原』「科学古典叢書」大日本出版 昭和十八年（一九四三）	はしがき §1 熱輻射論の背景 §2 ウィーンの変位則までの熱輻射論 §3 熱輻射分布法則の実験的理論的研究 §4 量子論の誕生
X	解題者が見たI・IIからIIIへのプロセス	← A → 科学史書としてほぼ完成する
III	『量子力学史』「天野清選集I」日本科学社 昭和二十三年（一九四八）	§1 十九世紀末におけるドイツ工業の発展と研究機関の増設 §2 十九世紀後半における理論物理学の展望 §3 熱輻射の理論的・実験的研究 §4 プランクの量子仮説の提唱

§2 対応原理

§3 量子力学の出発点

§4 波動力学の立場

§5 初期の統計的解釈と因

§5 熱輻射論と量子論の生長

〔同叢書・予告のみ。アインシュタイン『光量子仮説』〕

←B→ 科学史書としての磨き上げの途上

§5 光量子仮説——その応用と批判

§6 実験の技術とボーア以前の原子物理学

§7 ボーアの原子構造論への理論的道程

§8 過渡期の量子論I ——対応原理を中心として

§9 過渡期の量子論II ——光量子論をめぐる論究

§10 量子力学の発端

§11 波動力学の誕生と展開

§12 波動函数の物理的意味

果性否定

§6 不確定原理の本質

§7 量子力学における状態

§8 観測と統計

§9 観測装置とその Complementarity

〔同叢書・予告のみ。ハイゼンベルク『量子力学と不確定性原理』〕

C 歴史的叙述としてよりは批判的総合報告としてほぼ完成

D 科学哲学の論文としてほぼ完成

に関する初期の解釈

§13 変換理論より不確定性原理へ

§14 ハイゼンベルク思考実験の批評

§15 不確定関係の分析と批評

§16 量子力学における物理的量の状態の概念

§17 観測と統計

§18 相反補足性 Komplementarität

§19 相反補足性の概念

§20 相互排他的補足性

	←	——統計力学と熱力学の関係
§10 相対論的量子力学と量子電磁力学	←E→ Iの時期での総合報告としてそのまま収録	付§1 相対論的量子力学と量子電磁力学
§11 批判と反批判		付§2 批判と反批判
§12 核物理学における二、三の問題		付§3 核物理学における二、三の問題
§13 他の学問領域との交渉	←F→ 周辺問題と考えて除外	付§4 他の学問領域との交渉〔自然選書版に追録〕

そこで本書の各部分を、完成度の高いほうから順に並べるとすれば、

（E、F）——A——B——D——C

となろう。そしてE、Fは、昭和十二年当時としての緻密な総合報告としての古典的価値をもち、AはⅡをふまえてほぼ十分に完成されているといえるが、Bは磨き上げ（おそらく校正刷を著者が見るときになされえたであろう程度の）の途上にあってやや不備、Dは科学史論文のスタイルとしては問題が多いが、〈解釈〉いらい著者がもっとも深く考え尽くし「自信」をもつに至った見解の詳述としてユニークな価値をもつものというべきであろう。ただCは、歴史的経過に忠実ともいえず、総合的・批判的論述ともいえず、文献紹介風ないし解説書風

の筆致も散見され、著者の構想のゆらぎが跡をとどめているように思われる。
したがって、全体を通じて考えると、A、BのあとにCの一部（C′とする）があって、C′が歴史的叙述として完成されているならば、A－B－C′は表題どおりの「量子力学史」（厳密にいえば非相対論的な範囲での）として完結したであろうし、一方、Cの他の一部（C″とする）が〈解釈〉に関する introductory な叙述として完成されているならば、C″－Dは「量子力学（における観測の問題）の哲学的解釈」とでも題すべきモノグラフとして完結したであろうと思われるのである。いずれもが――今日なお――高い価値をもち、かつ、たがいに相補的な労作として並存しうるであろうことは、いうまでもない。

5　戦禍をのがれて世に出た『量子力学史』

とはいえ、原著者の生命が昭和二十年四月十三日の空襲の災禍によって突然に失われてしまったことを知るわれわれは、たとえ部分的に未完成の跡をとどめているとはいえ、この貴重な原稿が活字に写されたことを大きな喜びとしなければならない。その功労者の手記を選集版の『天野清選集刊行に当り』（編者大木孝）から、また功労者への謝辞を同『序』（菅井）から、それぞれ再録しておく。選集版初版の発行は、昭和二十三年三月、すなわち三党連立の芦田内閣の成立、全官公労組の新給与職階制反対三月闘争、理化学研究所が株式会社として発足（仁科芳雄社長）、東宝で千二百人の人員整理とスト、東京渇水二時間給水などが年表にしるされている時代、そしてＮＨＫのど自慢全国大会が始まり、美空ひばりがデビューしたころであった。
「……天野清先生の遺稿を、先生の三年忌を迎えんとする今日、ようやく出版するを得ましたことは、編集に当った者としてもっとも喜びとしまた怖れるところであります。
天野先生の厖大な業績は、該博にして哲学、文芸、宗教、歴史等の各分野にまで及び、学殖は精緻な立証と

相まってかなりな量に及んだものがあったのですが、それらがいずれも、あの呪うべき戦災の日に、先生といっしょにほとんど焼失してしまったことは恨みても余りあることでした」

「私は昭和二十一年の初め天野先生の御遺稿の出版を思いたちましたところ、さっそく御令弟の天野鉄次氏をおたずねして、それまでいくらか残っておりました先生の御遺稿を整理に参りました折、……先生が疎開しておかれたために助かった若干の蔵書の中に、埋(こ)れていたのがここに始めて日のめを見ることとなった、量子力学の発達の歴史を書かれた未定稿だったのです。

先生はきわめて科学的な正確、綿密、実証的な方で、そのうえ広く深い文学的な素養をもお持ちになっていた方で、その文章に対する御推稿(こう)の入念さは、容易に妥協を許さないという御性格が表われていました」

「……本選集の刊行について、私たちは日本科学社にとくに感謝しなければならない。とりわけ大木孝君の一年有余にわたる熱意にみちた労苦に対しては御礼の言葉もないくらいである。出版事情の困難をきわめたさ中に、同君はあまり一般向きでもない地味な本選集の編集に科学的情熱を傾けて従事されたのである。私たちはこのような人たちの努力のおかげで同志天野清の仕事を永久に記念できる。黙々として書きつづった彼の未定稿までがこうして世に問われ、新生日本の混迷期になんらかの光明を与えうるとしたら、私たちは編集の任にあたったこれらの人たちのことを決して見落してはならぬと思う」

選集版に対する反響は、『熱輻射論と……』に対するそれほどに派手ではなかった。やはり、当時の世情と本書の内容がそうさせたのであろう。しかし、この種の問題に関心をもつひとびとの間には深く強い印象を与え、それは長く絶えることがなかった。科学史とくに物理学史、科学論（とくに物理系の著者によるもの）、物理の講座や解説書などで本書に言及したものをリストするだけでも容易なことではない。やがてそれらの欄に

「絶版」の文字が書き加えられるようになり、こうして本書は、このたびの復刊版の編集者のいう「幻の名著」の運命をたどるようになる。

ところで、選集版刊行直後、強烈な読後感に支えられつつ、長文の紹介を書いたのは、この解題にもすでにたびたび登場した富山であった。追悼の部分は別として、本書の「読み方」の指針となるであろう部分を摘録しておくことにする。[21]

「まず（§1〜§3）量子論誕生の背景となる十九世紀末におけるドイツ工業の勃興に筆を起し、ベルリン……〔国立〕研究所を中心として熱輻射の実験的、理論的研究がいかに展開されていったかが詳細に述べてある。氏の商工省度量衡検定所における実験研究との関係もあり、叙述はきわめて緻密である。量子論の現状からみて、熱輻射の問題は今後このような歴史的発展の順序に従って述べられることも案外尠くなるかもしれない。その点から考えると、本書は貴重な文献としての意義をもつことになろう」

「つづいて（§4〜§5）、プランクの量子仮説、アインシュタインの光量子論等の画期的な理論の現われた今世紀の始めのころの物理学界の情勢がきわめてあざやかな形にえがかれている。……当初は唐突で不合理とも思われた提案が、次第に確実で包括的な理論に成長していく。古い世界観から不合理なものときめてそれより離れていくひとびとと不合理なところに新しきものの芽生を認めてそれを育てていくひとびととの間の対立が、天野氏によってドラマティックにえがかれている」

「真空技術と原子物理学との関係を説いた一章（§6）は、全体が教訓的な本書の中でもとくに教訓的な一節である。真空ポンプの改良がどのような新現象の発見に導いたかを説くあたり、教育家としての氏の一面がうかがわれる」

「トムソン、ラザーフォードを経てボーアに至る原子構造論の発展は、一般にも相当よく知られていることで

ある。……氏は、ボーアの理論の本質が対応原理のうちにあることを認めて、この原理が量子論の発展の上で演じた重要な役割についてもくわしく述べている。もっともこれから新しく量子論を学ぶものなどにとって、対応原理が過去にどんな役目を果したかというようなことは、一片の話題にすぎなくなるかも知れない。まして表面的には完全に失敗に終ったボーア、クラマース、スレイターの理論など、名さえ聞くことがなくなるかもしれない。……だが歴史というものは、われわれの知識に新しい次元をつけ加える。この世界では迂路や失敗の路も、成功の道と同じ重要さをもつ」

「ハイゼンベルク、……シュレーディンガー等の新しい理論……も始めはまちまちな形で現われ、さまざまの解釈が下されていた。それらが現在の量子力学という一つの体系にまとめられていく過程が、§10から§12までにくわしく説明されている。ここで、氏は、よく問題となる実証主義の俗説に対して注意を喚起している。……理論は実験的に検証される内容をもつべきものだというのなら、現代の科学にとってはあまりにも自明なことで、……問題は、かくのごとき主義が、実際に物理学を推進させるのにどれだけの意義をもつかという点にある。……氏は、物理的現実を追求する実証的態度と、科学批評家の一家言としての実証主義との間に著しい逕庭のあることを強く述べている」

「§12から§17までに、……氏は、不確定性原理に対する二つの見方を区別している。……両者の区別はきわめてデリケイトであるが、……後者〔天野〕の立場は、量子論においては粒子波動の古典的概念が無制限には適用できないけれども、しかもなおそれを『欠くことができない』というのに対し、前者の立場は欠くことができないというほどの積極的な意義を認めまいとする」

このあたりから富山は、新書紹介者というよりは多年の学友として「墓のかなた」の天野との討論を始めて

〔21〕 富山、『科学』第十八号（一九四八年）、一八六ページ。

しまう。

「生前、氏とわれわれとが議論を重ねたのもこの問題（相反補足性の問題、本書§18～§20）であった。相補性の考えに積極性を認める天野氏と消極的な意味より認めないわれわれとには、つねに一致する所がなかった。これもなつかしい思出である。氏は、自分の見解を主張して他を説得するということをあまりやらなかった。どちらかといえば、人をして語らしめて自己の信念を確かめていたとでもいわれようか。しかしいま、本書の一八一ページ（自然選書版二三六ページ）の『わが国の一部の学者のあいだにも……両者の抽象性のあいだに在する質的な飛躍を十分明瞭にしていない』……というような文章を読むと、墓のかなたからよびかける氏を思いうかべずにはいられない」

「ともあれ、相補性の考えを、おそらくボーア、ハイゼンベルク以上に、これほど強くかつ徹底的に弁護する人また文をみたことはない。この点だけでも本書は注目に値する労作だといえる」

「では、天野氏の立場とは一体どんなものか」と自問して富山は、本書の次の一節（自然選書版二四〇ページ）をあげている――「測定器械は古典理論に言われる意味で決定されていること……そのまま時空因果関係の規定たることを意味するものでもない」。そして富山は「これは単純に量子論の解釈に関する問題ではなく、深く精密科学の基礎にふれる一つの立場を表明しているのである」と書き添えて、この一節の意義を強調している。

　天野にとってさらに手強い論争相手であった武谷も、天野の戦災死に対し、「われわれのなげきと憤りは言いつくすことができない」と述べ、天野の反ファッショ的底流を高く評価し、さらに本書については「社会的背景、エピソードなどを豊富に折りこんだ、一般の人も読むことのできる平明なもの[22]」として「ぜひご一読を願う」と勧める一方、天野の「論理」に関しては、相変わらずのきびしい批評をあらわに表明した[14]。

「量子力学の発達の理論、ないし量子力学の論理構成につきましては、天野氏は諸家の意見にできるだけ忠実であろうとされたあとを見ることができ、この努力に対し敬意を表するのでありますが、天野氏の論理は、いまだ量子力学の論理をこなすのに十分であるとは思えないのです。ボーアの相補性の立場に安直に立ち、ために論理が平面的に止まっているという事ができます。これは一方に、天野氏が諸文献にできるだけ忠実であろうとされた事によるが、また一方時代の制約のためより進んで、唯物弁証法にまで至る事ができなかったのでしょう。しかし通俗な神秘主義には陥らず、きわめて即物的である事は、敬意を表すべきであろうと思います。この書から量子力学の論理について批判的に多くを学ぶことができるのであります」

また、名古屋大学の坂田らのもとで戦後しばらく物理学史の研究に打ち込み、『熱学史』の好著で知られた高林は、「熱輻射論……の発展の経路について〔は〕……何十回となく語られた。なかんずくわれわれは天野氏の綿密な研究をもっている」と書いて『熱輻射論と量子論の起原』をあげ、「この名著から教えられるところきわめて多かった」としながらも、「天野氏は熱輻射論の展開を克明に追跡したが、これをさらに掘りかえして発展の『物理的な核心をえぐり出す』ことに進まなかった。氏は思想史的・技術的関連をあざやかに浮彫にしてみせたが、自然の固有な構造に基〔づ〕く客観的根拠からの分析をおし進めなかったために、発展の論理を立体的に示しえなかった」と評し、「私はこの方法によって熱輻射論史にいくらかでも新しいスポットライトをあてたいと思う」と前置きして、「熱輻射論の構造について」論じた。[23] この方法論に支えられた高林の物理学史研究は、雑誌『自然』連載の「量子力学史」を経て、朝永振一郎編『物理の歴史』(毎日新聞社・昭和二十八年)に結実した。

〔22〕 武谷、前掲『量子力学の形成と論理I』、「はしがき」二ページ。
〔23〕 高林武彦、『科学史研究』第十四号(一九五〇年)一ページ。

一方、武谷の著書[22]は、著者の「論理」が詳細な原典研究で肉づけされている点に特色があり、とくに原子構造論の発展史が天野（本書§6、§7）ではやや簡略に扱われていたのを補うように編述されているところに意義が認められるが、後続するはずであった量子力学の「形成」、「論理」、「実験的基礎」あるいは原子物理学の形成に及ぼした「観念論と唯物論の役割」などが完結されていない以上、天野の〈史〉との全面的な比較評価にはなお耐ええないとしなければなるまい。

さて、その後の関連文献を丁寧にあげることはここでは不可能であるが、ひとまとめに言えば、〈史〉のA－B－C′については近年あらためて原典の集成、覆刻、翻訳などが大規模に展開され、学説史・体制史としての精密な研究が集積されており（M. Jammer, B. L. van der Waerden, T. S. Kuhn のほか、Fr. Hund, A. Hermann, 広重、辻、八木、西尾ら）、C″とD前半については覆刻、翻訳がますますにぎやかであり、Dの後半とくに観測の問題については今でも「まことに歯切れの悪い状態で……チャレンジングな問題」だと説かれている。[24] 詳しい文献リストを掲げている入手容易な書物を少しあげて[25][26][27]解題を終わることにするが、〈史〉を全面的に乗り越えた文献と呼べるものがはたしてそこに見出されるであろうか。

6　校訂者の立場から

「本書〈選集版〉の編者と出版者とに対してひとこと苦言を呈したい。読みにくい組方であるなどは別としても、誤植が実に多い。現代の印刷能力を考えるとき、僅かばかりの誤植などを問題にするのは心なきわざともいわれようが、これでは余りにひどすぎる。数式などになるとほとんど満足なものがないという有様である。貴重な内容のことを考えると遺憾の意を表せざるを得ない。……」

右の文も富山の紹介記事からの引用であるが、おそらく選集版の読者すべての感想を代表しているものとい

えよう。すでに引用した選集版編集者の手記にしるされた事情と、そして、解題者が知る範囲でも多くの証拠を示すことのできる「天野の原稿の複雑さ（消したり書き足したり、ひっくりかえしたり矢じるしでつないだり、欧語、数式、符号が何のことわり書きもなしに登場したり、本文より長い注があったり、等々）」からいえば、選集版編集者には大いに同情が寄せられるべきであり、結局は、本書の磨き上げと著者校正を不可能にした空襲を呪うしかないのであるが、選集版に欠陥があったことは否定できない。

このたびの復刊に際し、天野家のご遺族（とくに令弟、天野鉄次氏）と編集者のお勧めによって、これらの欠陥をできるだけ除去するための校訂を解題者があわせて担当することになった。以下は校訂者の立場での手記である。

校訂という仕事がどんなものであるかは、古典文学の覆刻本などに接した経験を通じて、多少は心得ているつもりであったが、また、とくに天野の著作については気づくたびに書きこみをしたりして、ある程度の準備はしてあるつもりであったが、着手してみるとこれはまことに困難な作業であることがわかった。

選集版の字句に疑義が生じたとき、天野の自筆原稿との照合ができれば、この困難はかなり減少したはずであるが、校訂者が探索した範囲では自筆原稿の発掘はどうしても不可能であった。（この点に関し情報をお持ちの方は、出版社を通じてご遺族なり校訂者なりにぜひご連絡くださるよう、ここでお願いしておきたい。）

〔24〕柳瀬睦男、『日本物理学会誌』第二十六巻第十一号（一九七一年）、八三五ページ。
〔25〕L・I・シッフ、井上健訳『新版・量子力学』下巻（一九七二年）吉岡書店。
〔26〕岩波講座『現代物理学の基礎』3〜5「量子力学1〜3」（一九七二年）。
〔27〕『世界の名著』66「現代の科学Ⅱ」、（一九七〇年）、中央公論社。

そこで校訂者は、本書の各部分ごとに、次のような校訂方針を採用することとした。（記号は前掲の内容分析表のそれと同じに用いる。）

（1）E、F　学会誌版〈解釈〉（原著者による誤植訂正ずみのもの、酒井五郎氏の提供による）に準拠する。

（2）A　選集版と大日本出版『熱輻射論と……』とを照合し、内容および文面が強い類縁関係にある場合には後者に準拠する。

（3）B、C、D　選集版と学会誌版〈解釈〉（同じく訂正ずみのもの）とを照合し、類縁の度の強い部分については後者に準拠する。

（4）どの部分についても、選集版に引用されている原典（天野自身による筆写ノートやリプリント版をも含む）およびその邦訳をできるかぎり参照する。

（5）物理的・数学的な意味あるいは歴史的な事実から判断して、自明の誤りは訂正する。

（6）論理上、文体上どうしても意味が通じがたい箇所および固有名詞以外の外国語が原綴のまま用いられている所については、一般の読者が通読できる程度に改め（校注〔1〕、〔2〕……として章末に注記）、また補筆（校注記号〔　〕で明示）し、校注すべきでない、あるいは校注しえない箇所は、選集版のまとし（ママ）ルビで明示する。

（7）選集版では、人名はほとんどすべて原綴で記されているが、ここでは一般の読者のためにすべてカタカナ表記に改め、そのかわりに巻末に人名索引を付す。

（8）引用符等の記号はできるだけ簡略化し、かつ統一する。

以上の方針による作業のうち、（4）によるものが最大の労力を要し、（6）によるものに最大の迷いとためらいが伴ったことは、読者も率直にご理解くださるであろう。しかし、できばえに関しては、戦時下の天野が

常用した「怱忙の間、意を尽さぬ……」の弁明の辞を借り、前掲の内容対照表の直前に引用した「寛恕を乞う」の辞を、偉大なる先輩とそのご遺族、およびこの自然選書版のすべての読者に対して、もういちど借用しなければならない。とりわけ、原著者の身に備わった、風格ある文体――富山はそれを「古典的な絢爛(けんらん)さを具えた達意の文」と評し、「近頃ではこのような文体のものをみかけることも尠(すくな)くなった」と嘆いている――が、まさに近頃風に汚染・改悪されたのではあるまいかと、校訂者の危惧はつのるばかりである。とはいえ、幸いにも出版社側の自然選書編集室が情熱をもってこの仕事に臨み、たえず校訂者を激励し、時に校訂者の曲解・独断をいましめてくれたので、今はともに墓のかなたの人となられた天野、富山両先生もこのたびは「余りにひどすぎる」とはおっしゃるまいと信じつつ、名誉ある解題・校訂の仕事を一段落とする次第である。

高田誠二

一九七三年盛夏

天野清略年譜

凡例

故人の略歴に、その労作（論文、報告、著書、抄録、講演、翻訳、未定稿、他への協力など）を、（I）思索的と（II）実践的の両面に分類して配列した。記号は以下の略記である。

〔自〕：自筆の中央度量衡検定所調査報告。
〔未〕：未定稿。
〔選〕：『天野清選集』（一九四八年）に収録。数字は巻数。
〔19〕：日本学術振興会第十九小委員会資料。
〔50〕：『中央計量検定所創立五十周年記念論文集』（一九五八年）に収録。
〔共〕：共著者。
〔孔〕：孔版刷。

なお、本表中に記載されている「計測」は、戦前に日本度量衡協会が刊行した雑誌で、戦後の日本計測学会の会誌とは別のものである。

年次	略歴	I	II
明治四十年 一九〇七	四月　醸造業天野亀太郎長男として東京府下豊多摩郡内藤新宿に生まれる。		
大正十四年 一九二五	三月　高千穂中学校卒業。		
昭和三年 一九二八	三月　東京高等学校高等科理科を卒業。		

七年 一九三二	三月　東京帝国大学理学部物理学科を卒業。 四月　九州帝国大学工学部助手を拝命。九州帝国大学付属第八臨時教員養成所講師を嘱託せられる。	桑木彧雄：『アインシュタイン伝』(昭和九)に協力。	
九年 一九三四		「不確定関係の直観的導き方への注意」〔未〕〔選2〕	
十年 一九三五	四月　商工技師を拝命。商工省中央度量衡検定所勤務を命ぜられる。		「ガスメートル（乾式）が空気とガスとで器差が異なる事実とメートルの配置順序との関係」〔自〕〔50〕
十一年 一九三六		「Photon〔光子〕散乱の実験と因果性問題」「科学」6　二三九ページ寄書。 「W. Bothe u. H. Maier-Leibnitz, Compton Effekt und Photonentheorie,〔コンプトン効果と光子論〕*Gött. Nachr.* 2 (1936) Nr. 10, の紹介。」「数物会誌」10（一九三六年）三二四ページ。 「量子論解釈の変遷とその文献(I)」「数物会誌」10（一九三六年）四四五ページ。	「ガスと空気との漏洩量の差の測定」〔自〕〔50〕 「同右第二報告」 「深海顛倒温度計補正の標準に関する件」〔自〕〔50〕 「大型ガスメータの検定方法に関する調査報告」〔自〕〔50〕 抄録：「気体量測定と湿度の影響」ゲー・ルッペル　ATM一九三三より。「計測」第二号。
十二年 一九三七		抜粋「現代物理学の原理的諸問題 W. Heisenberg, *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft, Erweit. Aufl.* (1936)」より。「科学」増	「商工省光高温計標準目盛に関する報告」〔孔〕〔19〕 「写真による温度測定法」〔自〕 「Photopyrometry and its Application

		刊号。 「量子論解釈の変遷とその文献(Ⅱ)」「数物会誌」11（一九三七年）五八ページ。 「量子論解釈の変遷とその文献(Ⅲ)」「数物会誌」11（一九三七年）一四八ページ。	〔写真による高温測定とその応用〕数物学会（六月）発表。要旨：「数物会誌」11（一九三七年）一九五ページ。 「キュポラ炉湯出時における熔銑流の温度分布」〔孔〕〔19〕
十三年 一九三八	二月、日本学術振興会第十九小委員会の研究を嘱託せられる。		「国際温度目盛について」「計測」第三号。 抄録：「製品の検査と確率論の応用」K. Franz の著書より。「計測」第七号。 「光高温計の目盛検査と標準電球の使用法」「計測」第十一号。〔共〕杉本清。
十四年 一九三九	四月　東京高等学校高等科講師を嘱託せらる。 八月　国際度量衡総会に参列のため出発。開戦のためシンガポールより帰る。	「N・ボーアの一小篇」「科学」9　一二九ページ寄書。 抜粋：N・ボーア「自然哲学と人間文化」*Nature*, 143 (1939) p. 268 より。「科学」9　二四五ページ。 書評：「M. Planck, *Determinismus oder Indeterminismus.* (1938)」「科学」9　二六〇ページ。 「物理学者ウィーンの回想記」「科学日本」四月号〔選2〕	抄録：「高温計保護管」ATMおよびArch. f. Eisenhüttenwesen より。「計測」第十二号。 「廻転筒型ガスメートルに関する研究」〔共〕竹内喜一郎。〔自〕〔50〕 「光高温計標準目盛作製の経過大要」〔孔〕〔19〕〔50〕 「英米独国立検定所の光高温計検査成績」〔孔〕〔19〕〔50〕渡辺襄の名で。 「光高温計検査装置説明書」〔孔〕〔19〕渡辺襄の名で。 抄録：「高温保護管における気体透過度」ATMより。「計測」第十六号。 「熔鋼現場における高温計の使用について」〔孔〕〔19〕〔50〕

十五年 一九四〇		岩波講座物理学「物理学史年表（菅井・湯浅）」に協力。「物理常数表（芝亀吉）」に協力。	「一六〇〇℃以上に使用しうる金属熱電対」「計測」第十六号。
十六年 一九四一	四月、日本科学史学会創立とともに幹事となる。六月　日本学術振興会第十七特別委員会委員に任ぜられる。	新書紹介：三木清編『新版現代哲学辞典』（改訂版）およびP・ヨルダン著、中野廣訳『二十世紀の物理学』「科学」11　二一五ページ。「量子論史に因む一挿話」「科学」11　三〇六ページ。「明治度制の起原と内田五観」科学史学会例会（十月）に発表。「科学史研究」第一号　一三一ページ。〔選2〕	講演：「高温度の測定について」特殊鋼協議会　帝国ホテルにて。紹介「抜検査による製品の比較の確率論的考察」「計測」第十七号。「光高温計による鋼の鋳込温度測定の精度」〔共〕酒井五郎「計測」第十八号。著者『実用温度計』「回転子型ガスメートルの計査報告」〔共〕竹内喜一郎。〔自〕〔50〕「回転子式ガスメーター」「動力」第七十八号。〔共〕竹内喜一郎。〔50〕訳：「回転子式ガスメートル検定に関するドイツ国立物理工学研究所規定」〔共〕竹内喜一郎「計測」第十八号。
十七年 一九四二	十二月　帝国学士院より明治前日本科学史編纂を嘱託せられる。	「或書の探究」「科学史研究」第二号三十ページ。〔選2〕訳および注。N・ボーア『光と生命』N. Bohr, *Licht und Leben, Naturwiss.* 21 (1933) 245 と *Nature*, 131 (1933) 421, 457. より。「科学日本」七月号。「熱輻射論と量子論の起原」日本科学史学会例会（九月）に報告。「度量衡史話（I）」「計測」第二十号。〔選2〕	「光学ガラス面の鍍金の強化について」数物常会（十月）発表。「数物会誌」第十六号。二六ページ。抄録「科学」13　一〇ページ。講演：「温度測定法講習会」（十一月）

十八年 一九四三	六月　日本学術振興会第五十四小委員会委員に任ぜられる。	「物理学の現実的基礎」「科学日本」二月号〔選2〕 三月　著書『熱輻射論と量子論の起原』(科学古典叢書)〔選2〕	「相の平衡とトポロギー」数物常会（一月） 「科学」13　九〇ページ〔選2〕 講演：「光高温計による熔鋼温度測定法」日鉄講演集。〔50〕 講義：「光高温計による温度測定」熱工学講座プリント。〔孔〕 「白金線の電気抵抗(I)」数物常会（九月）。
十九年 一九四四	四月　東京工業大学助教授に任ぜられる。 軍需技師に任ぜられる。 東京工業大学付属予備部講師を嘱託せられる。 五月　学術研究会議より物理学研究委員会委員を嘱託せられる。 立教理科専門学校講師を嘱託せられる。	「ハインリヒ・ヘルツの生涯と業績(I)」「科学」14　一一二ページ。〔選2〕 「ハインリヒ・ヘルツの生涯と業績(II)」「科学」14　一五五ページ。〔選2〕 「戦時下における科学技術史」「科学史研究」第八号 六月　著書『誤差論』出版。	「白金線の電気抵抗(II)」数物常会（五月）。
二十年 一九四五	四月十三日の東京大空襲で、東京都淀橋区西落合一丁目九番地自宅付近にて被爆、翌十四日没。享年三十八歳。東京都港区麻布一本松町徳正寺に葬る。戒名、皎潔院釈清勲居士。		
二十一年 一九四六			「熱電温度計故障統計調査」（遺稿）。〔19〕

二十三年 一九四八

選集 第一巻『量子力学史』
選集 第二巻『科学史論』
〔第三巻『測定論・誤差論』、ただし未刊。〕
「エネルゲティーク前史」〔選2〕
「国立物理工学研究所設立の歴史」〔選2〕
「世界観と物理世界の存在構造」〔選2〕
「古典力学の展開と不可逆性」〔選2〕
「物理学と数学に関する覚書」〔選2〕
「量子論誕生の技術的背景」〔選2〕
「ウェッヂウッド」〔選2〕
「熱輻射史」〔選2〕
〔以上は未定稿で、執筆時期は不明である。〕
著書『度量衡』 創元社「科学の泉」
『アインシュタイン 光量子仮説』（科学古典叢書）
『ハイゼンベルク 不確定性原理』（科学古典叢書）
〔以上は、予定のみで完結しなかった。〕

「標準熱電対の較正試験法参考資料（Ⅰ）（Ⅱ）」
G. Ribaud の著書より抄訳。〔19〕
「高温度測定に応用せられる熱輻射の理論と実際」。〔雑誌「科学測器」のための原稿、雑誌廃刊のため印刷されなかった。〕
抄訳：A. Schulze, Metallische Werkstoffe (1940) より。
〔これは予定のみで完結しなかった。〕

三十五年 一九六〇

四月、「世界大思想全集」にボーア「自然哲学と人間文化」、「光と生命」の訳〔既掲〕が再録。

三十九年 一九六四

二月、日本学士院編「明治前日本物理化学史」の五、『度量衡』出版。

（高田誠二編）

文献略号表

1. *A. QT.* *Anschauliche Quantentheorie* (1936), P. Jordan.
2. *AT. NB.* *Atomtheorie und Naturbeschreibung* (1931), N. Bohr.
3. *GT. QM.* *Gruppentheorie und Quantenmechanik, 2te Aufl.* (1931), H. Weyl.
4. *M. G. QM.* *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), J. von Neumann.
5. *P. Q. M.* *Principles of quantum mechanics* (1ed., 1930 and 2ed., 1935), P. A. M. Dirac.
6. *P. QT.* *Die physikalische Prinzipien der Quantentheorie* (1930), W. Heisenberg.
7. *P. W.* Die allgemeine Prinzipien der Wellenmechanik. W. Pauli, *Handbuch der Physik* (hrg. Wien und Harms), Bd. 23(1926)
8. *QT.* Quantentheorie, W. Pauli, *Handbuch der Physik* (hrg. Wien und Harms), Bd. 23 (1926).
9. *TS. AC.* *Theory of spectra and atomic constitution* (1922). N. Bohr.
10. *Wandl.* *Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft,* (*2te Aufl.*, 1936), W. Heisenberg.
11. *F. P. Q. M.* *The fundamental principles of quantum mechanics* (1937), E. C. Kemble.

ワ 行

マ 行

ナ 行

ハ 行

タ 行

サ 行

カ 行

人名索引

ア 行

天野 清　あまの・きよし
1907年、東京に生まれる。
1932年、東京帝国大学理学部卒業。1935年商工省中央度量衡検定所勤務。1944年、東京工業大学助教授。1945年、4月13日の東京大空襲により被爆、翌日死没。
著書に、『熱輻射論と量子論の起原』『誤差論』『実用温度計』の他に、論文・翻訳多数。

自然選書　検印廃止

量子力学史　1350円

著者　天野 清

昭和48年10月20日初版発行
昭和53年9月20日7版発行

発行者　高梨 茂
本文印刷　三晃印刷
表紙印刷　トープロ
製本　小泉製本

発行所　中央公論社

東京都中央区京橋 2-8-7
電話(561)5921　振替東京 2-34

自然選書刊行のことば

今日の人類にとっては、科学はすでに特殊専門の業務ではありません。それは、社会のあらゆる部分の深層にまで浸透し、現代における人間存在の根底にかかわるものとなりつつあります。今や、この巨人の出現と成長によって、思想も、文化も、教育も、人類全般の知的活動の型が、一時代前とは根本的に異なるものとなることをせまられています。

それにもかかわらず、わが国における出版活動がそのような時代の変化に的確に対応しえていたかどうかを考えると、残念ながらわたしたちは疑問を感じないではいられません。視野の限定された特殊の専門書とか、あるいは初学者のための入門書や解説書は少くありませんが、科学の問題を人間活動の中心的ジャンルの一つとしてとらえるという態度は、むしろ乏しかったように思われます。

そのような反省の上に立って、わたしたちはここに新しく『自然選書』とよぶ双書を刊行して、現代社会の強い要請に応えたいと考えました。わたしたちは昭和二十一年以来、雑誌『自然』の刊行をつづけ、科学ジャーナリズムの確立と発展にいささかの力をつくしてきましたが、その実績をふまえて、さらに内外の新しい展開を摂取しつつ、この『自然選書』を真に充実した科学書のシリーズに育ててゆきたいと考えているのであります。

科学はしばしば、難解でしかも無味なものと考えられがちでありますが、十分な用意と適切な表現をもって提供された場合には、それはすべての人間に新鮮な知的刺戟を与え、生存の喜びを感じさせるものであることを、わたしたちは確信しています。そのような確信のもとに、高度の水準と視野の広さを保持しつつ、真に味読に値する科学書を刊行することが、わたしどもの念願であります。ご支援をお願いいたします。

一九七二年三月

中央公論社

NATVRA ARCHIV

自然選書既刊49点より

天才の精神病理
—科学的創造の秘密
東大講師 飯田真
名市大助教授 中井久夫
ニュートン、フロイト、ウィーナーなど六人の卓越した自然科学者たちの病蹟を診断し、「創造性」の発展と抑止の秘密を明らかにする
写真・図表一三点／二五二ページ

日本野生動物記 正・続
女子栄養大学教授 小原秀雄
豊富な図版と挿話を織りまぜて、崩れゆく日日の自然の中で滅び、また生きつづける哺乳類たちの野生の現実を地球生態的視点で探る
正一八八ページ／続一九四ページ

生命現象を探る
—生化学の創始者たち
千葉大教授 丸山工作
現代科学の最前衛ライフ・サイエンスの中枢をなす「生化学」の形成に画期的な貢献をした六人の研究者の迫力にみちた研究活動の軌跡
写真・図版六二点／二六四ページ

発想のモザイク
—技術開発の民族風土
日大教授 佐貫亦男
「技術開発」に各国民の発想パターンがいかなる影響を及ぼしているか。航空技術の権威が技術革新上の発想法開発を具体的に比較分析
写真・図表九一点／一八四ページ

数のエッセイ
京大教授 一松信
数学の難しさの意味や、「数」のさまざまな姿について、数学的エスプリのきいた語り口で説き、数学のエレガントな世界へ招待する
写真・図版五六点／二〇八ページ

かに星雲の話
—超新星の爆発
東大助教授 石田五郎・京大助手 大谷浩・東大助教授 森本雅樹
茨城大教授 浜田哲夫・名大教授 早川幸男・東大教授 小田稔
物理学の壮大な実験室として常に新たな問題を提起してきた魅惑の天体「かに星雲」の謎を追う。第一線研究陣による最新成果の報告
写真・図版六五点／二〇二ページ

量子力学史　天野 清

二十世紀物理学の精髄をなす量子力学の形成を見事に叙述して「幻の名著」と謳われる天野博士の遺著。増補改訂版(校訂・高田誠二)写真・図版一八点／三六四ページ

科学の社会史——近代日本の科学体制　廣重 徹

近代日本における科学の社会体制化の全過程を世界史的スケールで追究して、「科学とは何か」の問いに具体的・全面的に応える力作写真・図版二九点／三五〇ページ

実験に生きる　熊谷寛夫

信州で凧上げに興じて50年。中性子の実験や加速器の建設に打込んできた著者の履歴は、そのままわが国の原子核物理学の歩みである写真・図版五二点／二三八ページ

時間とは何か　大阪・名大名誉教授 伏見康治　上智大教授 柳瀬睦男 編

渡辺慧、山内恭彦、伏見康治、柳瀬睦男、亀淵迪、小野健一、早川幸男、村上陽一郎の諸氏による最新時間論集。巻末に総合討論を収録写真・図版三四点／二三二ページ

スピンはめぐる——成熟期の量子力学　東京教育大名誉教授 朝永振一郎

相対論と量子論を両親とする「恐るべき子供」スピンの出生の秘密とその成長過程を明快に叙述し、成熟期の理論物理学の核心を捉える写真・図版三九点／三七二ページ

日本自然誌の成立——蘭学と本草学　東大名誉教授 木村陽二郎

西欧との接触で日本に初めて移植された科学が、蘭学の興隆と近代自然誌の探求によって日本に根づいてゆく過程を雄大な構想で描く写真・図版四三点／三七二ページ

キリンのまだら——自然界の統計現象　平田森三

キリンの斑に関する奇抜な類推、常識を打ち破った鯨の平頭銛など、割れめの考察から自然界の統計現象を平明に語る洒脱な物理夜話写真・図版六一点／二六八ページ

生物時計の話

山口大助教授　千葉喜彦

蚊柱の立つ時刻から人の生活リズムまで、環境に適応する巧みな仕組として生物が獲得してきた様々な体内時計。毎日出版文化賞受賞
写真・図版七五点／二一六ページ

新物理の散歩道　第一〜三集

ロゲルギスト

情報とエネルギーの眼から日常身辺を見なおして、新鮮な物理感覚をよびさまし、楽しい知的散策に誘う。ロゲルギストの新シリーズ
各二〇〇〜二三〇ページ

科学のライフサイクル

未来工学研究所副理事長　林雄二郎
筑波大教授　山田圭一　編

基礎研究・製品開発・研究組織に見られる成長→成熟→衰退のライフサイクルを実証し、新しい科学政策を提言する「科学の科学」の展開
図版四六点／表二七点／一七六ページ

しゃぼん玉
—その黒い膜の秘密

お茶の水女子大教授　立花太郎

家庭用洗剤でしゃぼん玉をつくり、しゃぼん玉に現われる黒い膜の観察と考察から、太陽電池を営む黒い膜の壮大な未来像を予見する
写真・図版七九点／一八四ページ

X線天文学
—X線星からブラックホールへ

東大教授　小田稔

宇宙の彼方からX線を放つ天体——X線星の正体を追いつめて、あらゆる物質をのみこむ宇宙の「黒い穴」に挑む、新しい天文学の報告
写真・図表六四点／二一六ページ

栽培植物の世界

大阪府立大教授　中尾佐助

身近な植物は、大部分が栽培植物——人間が約一万年もかけてつくりあげた最も重要な文化財である。その由来と未来を語る植物百科
写真・図版一九点／二五六ページ

猿人
—アウストラロピテクス

京大教授　江原昭善
東大教授　渡辺直経

われわれ人類の祖先はなんであったか？　本書はヒトとサルとを結ぶ〝猿人〟の発掘によって人類原始の痛ましい現実を明らかにする
写真・図版七六／二七六ページ

ブラックホール
―一般相対論と星の終末
京大教授 佐藤文隆
ローマ大教授 R・ルフィーニ
全てのものを呑み込むブラックホール、全てのものを吐き出すホワイトホール。その謎を追究する日伊の気鋭学究による本格的入門書
写真・図版八五／二九六ページ

新しい科学的精神
G・バシュラール
関根克彦訳
二十世紀の科学は人間の思索にどのような革新をもたらしたか。詩論家バシュラールの科学的論究の出発点をなす記念碑的名著の完訳
二九二ページ

アインシュタイン研究
日大助教授 西尾成子編
アインシュタインが物理学にもたらした革新性に関する従来の解釈に再検討を迫る、ホルトン、広重徹、クライン、クーンによる論究
写真・図版六／三七六ページ

量子論の発展史
名古屋大教授 高林武彦
量子力学の生誕五十年。人類史上に画期的な物理的創造の過程への、著者の四半世紀に及ぶ考察と構想を結晶させた、最新の量子論史
図版二四／三六八ページ

素粒子をつくる時代
高エネルギー物理学研究所教授 川口正昭
巨大マシンを駆使して、カラー、チャームを属性とする新粒子をつくる物理学の現状を生き生きと伝える、一研究者の現場からの報告
写真・図表二五点／二三〇ページ

回転する生命
東大教授 飯野徹雄
微小な生物の体表で回転する「べん毛」をめぐって、最新の生物学の知識と方法を総動員して明らかにされた、生命の巧妙な分子構築
写真・図版五二点／一九八ページ

一化学者の回想
根津化学研究所名誉所長 玉蟲文一
欧米科学者との積極的交流、戦後の新制大学組織と科学教育にかけた夢と現実を通して、日本の化学研究と教育の五十年を回想する。
写真四九点／二四八ページ

88-1017-02